

スピノレリナの培養を目的とした微小重力下における気液界面の形状制御に関する工学的研究

著者	大平 勇一
学位名	博士（工学）
学位の種別	論文博士
報告番号	乙第38号
研究科・専攻	工学研究科・物質工学専攻
学位授与年月日	2000-09-14
URL	http://hdl.handle.net/10258/1146

スピルリナの培養を目的とした微小重力下における
気液界面の形状制御に関する工学的研究

六一

①

スピルリナの培養を目的とした微小重力下における
気液界面の形状制御に関する工学的研究

2000年9月

大平勇一

目次

第1章 緒論	1
1 本研究の背景	1
2 既往の研究	3
3 本研究の目的	8
4 本研究の構成	8
第2章 地上1Gにおけるスピルリナの培養	13
1 緒言	13
2 実験装置及び方法	14
3 実験結果及び考察	16
3.1 スピルリナの増殖速度	16
3.2 スピルリナの増殖速度に及ぼす亜硝酸イオン初濃度の影響	18
3.3 スピルリナ懸濁液からの直線状藻の除去	19
3.4 磁気暴露によるスピルリナの直線化	20
4 本章の結論	21
第3章 地上1Gにおけるスピルリナによる酸素供給	38
1 緒言	38
2 実験装置及び方法	39
3 実験結果及び考察	41
3.1 呼吸速度に及ぼす周期的光照射の影響	41
3.2 酸素発生速度に及ぼす周期的光照射の影響	44
4 本章の結論	48
第4章 微小重力下における回転容器内の気液界面形状	69
1 緒言	69
2 実験装置及び方法	70
3 結果及び考察	73
3.1 接触角	73
3.2 固定容器内の気液界面形状	73
3.3 容器回転速度の影響	76
3.4 初期条件の影響	77
3.5 容器濡れ性の影響	78
3.6 液量率の影響	78
3.7 軸の影響	79
4 本章の結論	80

第5章 微小重力下における中空回転液層の形成	95
1 緒言	95
2 実験装置及び方法	96
3 結果及び考察	97
3.1 中空回転液層形成の判定基準	97
3.2 中空回転液層形成に及ぼす液物性の影響	98
3.3 中空回転液層形成に及ぼす容器形状の影響	100
3.4 中空回転液層形成マップ	101
4 本章の結論	102
第6章 微小重力下における気泡破裂時間	118
1 緒言	118
2 実験装置及び方法	118
3 結果及び考察	119
3.1 気泡径	119
3.2 液粘度の影響	119
3.3 気泡形状の影響	120
3.4 気泡発生頻度の影響	120
3.5 遠心加速度の影響	120
4 本章の結論	121
第7章 通気エネルギーを利用した中空回転液層の形成	137
1 緒言	137
2 実験装置及び方法	137
3 実験結果及び考察	138
3.1 ガス流量の影響	138
3.2 容器形状の影響	140
3.3 液物性の影響	141
4 本章の結論	141
第8章 本研究の総括	158
使用記号	162
引用文献	165
謝辞	170

第1章 序論

1. 本研究の背景

1961年旧ソ連が世界初の有人宇宙飛行に成功してから、アメリカ合衆国のアポロ計画、ロシア(旧ソ連)の宇宙ステーション「ミール」の運行、スペースシャトルの運行など人間が宇宙で活動する機会が増えてきた(宇宙開発事業団,1997)。これまでミール、スペースシャトルを利用した理工学実験、医学系実験など多くの実験が行われてきた。一方で、日本、アメリカ、ロシア、カナダ、欧州連合による国際宇宙ステーション計画が進行中である。この国際宇宙ステーションが完成すればさらに多くの宇宙環境利用実験が行われ、多くの人間が長期間に渡って宇宙に滞在すると予想される。

宇宙ステーションで人間が長期滞在する場合、生命を維持するために水、食糧、酸素等の安定供給が重要な課題となってくる。人間1人が1日に必要とする酸素は910g、水、食糧、酸素など人間活動に必要な物資は約30kg、1年間では11tと言われている(新田, 1986)。地球から必要な物資をスペースシャトルなどで運搬する場合、運搬コストは物資1tあたり約10億円と非常に高くなるため、将来的には宇宙ステーション内ですべての物資を自給自足するための物質循環システムが必要である。

閉鎖生態系生命維持システム(CELSS, Closed Ecological Life Support System)における水供給に関しては、可溶性不純物を多く含む排水から水を得る方法としてTrusch (1982)及び新田(1986)は排水の単蒸留を提案している。しかし、単蒸留は重力に依存した方式である。一方、黒川ら(1995)は重力に依存しない方式として活性炭処理と膜蒸留法によって水を得る方法を提案している。

食糧供給については、緑藻クロレラ(川原ら,1995; 細野ら,1993)、藍藻スピルリナ(小口ら,1985)、魚類・イモ類(大矢・新田,1985)について検討されている。これらはタンパク質を藻類や魚類によって供給しようというものである。

酸素供給については、化学反応により二酸化炭素を酸素に変換する物理化学的方法(例えば、Johnsonら,1993; Nitta and Yamashita,1985; 小口ら,1985)と微生物の光合成能を利用して二酸化炭素を酸素に変換する生物学的方法(例えば、Shelefら,1970; 大矢・新田,1985)が検討されている。Johnsonら(1993)の物理化学的方法は固体アミンに二酸化炭素を吸着させた後、熱分解を行って酸素を発生させる方法である。Shelefら(1970)の提案している生物学的方法は*Chlorella pyrenoidosa*の光合成によって酸素を供給す

るとともに、増殖した*C.pyrenoidosa*を回収して食糧として供給するものであるが、*C.pyrenoidosa*を培養するためのバイオリアクター及びそのシステムに関する記述が、微小重力環境を想定しておらず、重力に依存した形態となっている。白石ら(1994,1995)は、めだかと*C.vulgaris*及びめだか-ミジンコ-*C.vulgaris*からなるCELSSを考え、めだか数と酸素濃度の関係についてシミュレーション計算を行っている。しかし、計算手法が中心であり、周辺機器類や培養装置などに関する記述はない。小口ら(1985)は閉鎖環境内のガス交換及び食糧供給を行うため、藍藻スピルリナによって二酸化炭素を酸素に変換し、酸素回収に膜分離法の使用を想定している。しかし、膜分離法はその性能が分離膜面積に大きく依存する。多数の人間が生活するため膜面積を大きくする必要があり、設置面積が大きくなる。宇宙ステーションなど閉鎖系環境内では装置・機器類の設置面積が大きくなると居住スペースが削減されること、藻体やその代謝生産物による目詰まりを取り除く逆洗操作のために高圧液体を使用するなど問題もある。しかし、アミン類など人体に有害な物質を使用する物理化学的方法に比べて、生物学的方法はそれらの物質を使用しないため、万一事故などが起きた際の安全面でも優れている。

最近では藍藻、特にスピルリナが注目されている。スピルリナはFig.1-1に示すよう、らせん形をした光合成微生物である。Table 1-1に示すようにスピルリナはタンパク質含有率が高く、脂肪が少ない健康補助食品として市販されているおり、スピルリナの構成成分に関する研究(Peerapornpisalら,1999)、乾燥法の違いによる成分の変化に関する研究(Baranowski,1984)が活発に行われている。Table 1-2にスピルリナとクロレラの特徴を示す。スピルリナは藍藻に属し、大腸菌や枯草菌などとともに下等微生物に分類される。多数の細胞が集合してらせん状の形態(200-500 μ m)で生息し、1細胞が2細胞に分裂する。一方、クロレラは緑藻に属し、清酒酵母や黒麹カビなどとともに高等微生物に分類される。球形または楕円体の細胞(2-12 μ m)が単独で生息し、1細胞が2~8細胞に分裂する。栄養学的見地から見るとクロレラは細胞壁を持っているため消化吸収率が60%程度で、細胞壁に対して超音波破碎処理を施しても80%程度である。一方、スピルリナは細胞壁を持っていないため消化吸収率が95%と高い。工学的観点から見てクロレラは至適温度が低く、温度管理が容易であるという利点があるものの、培養液のpHが約6であるため、他の微生物によるコンタミネーションに対して常に注意を払う必要がある。一方、スピルリナはクロレラに比べて至適温度が若干高いもの

のほとんど同じ温度域で培養可能であり、pHが約10という塩基性培養液中で増殖するため、他の微生物によるコンタミネーションを起こしにくい。また、藻体が大きいいため機械的回収が容易であること、炭素源である二酸化炭素を吸収しやすいことなどの利点がある。

藍藻スピルリナによる光合成を利用することによって、微小重力閉鎖環境内の二酸化炭素を酸素に変換することができると予想されることから、藍藻スピルリナは酸素供給に適した藻体であるといえる。

2. 既往の研究

2.1 スピルリナに関する研究

地上1Gにおいて、スピルリナの培養法に関する研究が進んでおり、すでに大日本インキ化学工業㈱などによって大規模な工業生産が行われており、健康補助食品として市販されている。これまでに、研究室レベルの小規模培養(小林・藤田,1996; Ogawa and Aiba,1978; Huang and Chen,1986)から屋外における大規模培養(Torzilloら,1991; Voinshakら,1983)について報告されている。スピルリナの代表的な培養法として光独立栄養培養(例えば、小林・藤田,1996)と混合栄養培養(例えば、Ogawa and Terui,1972; 滝口・間瀬,1973)がある。前者は光エネルギーによって二酸化炭素を固定化して増殖するものであり、酸素を生成する。一方、後者は糖類などの有機化合物を用いて増殖するものであり、二酸化炭素を生成する。本研究では二酸化炭素を固定化して酸素を生成させることを目的としているため、光独立栄養培養法を用いる。

通常、スピルリナなどの光独立栄養微生物の培養を行う場合、培養装置の形式選定が重要である。微生物を培養する場合、一般的な培養装置として気泡塔型と通気攪拌槽型がある。両者とも槽底部から気体を供給することにより培養液中に気泡を分散させ、気泡は気液界面で破裂する。スピルリナは培養液中の溶存酸素濃度が大きくなると増殖速度が低下するという報告がある(濱崎ら, 1993)が、両形式とも通気を行うため、二酸化炭素を溶解させると同時に培養液中の酸素を放散させることが可能であり、増殖に及ぼす溶存酸素の影響からの装置形式の選定は難しい。

気泡塔型培養器は通気による液混合・液循環を行うため剪断応力が小さく、装置構造が簡単のためスケールアップが容易であるが、気泡の微細化が難しいため物質移動速度を極端に大きくできない。一方、通気攪拌槽型培養器は攪拌翼の旋回により液を

混合・循環させるため剪断応力が大きくなるが、攪拌翼により気泡の微細化が促進されるため、物質移動係数を大きくできる。本研究で用いるスピルリナは剪断応力によって細胞が破壊されやすいため気泡塔型培養器が適している。

微小重力下においてスピルリナの人工培養を行う場合、供給ガスに含まれる様々な微量成分や周辺機器類から発せられる電磁波の影響を検討しておく必要がある。燃焼排ガス等には二酸化炭素と共に微量の窒素酸化物が含まれている。Kobayashi and Fujita(1996)は藍藻*S.platensis*を高濃度領域で培養する場合、硝酸イオンの不足により増殖速度が低下すると報告している。排ガス供給に伴い硝酸イオンが生成するため、これを利用すれば外部から補給していた硝酸イオン等の窒素源添加量を減らすことが可能になる。*S.platensis*の培養液は塩基性であり、培養液に窒素酸化物が溶解すると硝酸イオンと亜硝酸イオンが生成すると予想される。亜硝酸イオンは硝酸イオンと競合し、硝酸イオンの代謝を阻害することが藍藻*Anacystis nidulans*で報告されており(Maduenoら,1987)、同じ藍藻ではあるが属の異なる*S.platensis*においても同様の現象が起こる可能性がある。一方、Matsumotoら(1997)は窒素源を硝酸塩から亜硝酸ナトリウムに置き換えた培養液や、一酸化窒素を含む模擬排ガスを用いて緑藻*Nannochloropsis salina*の培養を行い、*N.salina*の増殖に影響を及ぼさないこと、一酸化窒素の溶解により生成する亜硝酸イオンが窒素源として利用可能であると報告している。しかし、緑藻と細胞構造が異なる藍藻*S.platensis*では確認されていない。

一方、地球上の生物は地球の持つ地磁気の影響を受けながら生活している。また、宇宙ステーションは恒常的に宇宙線に暴露され、人体に有害な紫外線や電磁波の影響は地磁気よりも大きいと予想される。地磁気は日常的に使用する磁石などから発せられる地場よりも小さく、異常のある地域でも 10^{-4} Tオーダー(Kuboら,1987)である。そこで、生物に及ぼす磁場の影響について多くの研究者が検討を行っているが、微生物の増殖やHuman cellのDNA構造に及ぼす磁場の影響等を検討した報告がほとんどである(例えば、Hiranoら,1998; Fioraniら,1992; Okunoら,1993,1994)。Takahashi and Kamezaki(1985)はスピルリナと同じく光合成を行うクロレラに静磁場を暴露し、その増殖に及ぼす影響を検討しているが、前述したようにスピルリナとクロレラは生物学的分類がことなるため、同様の結果が得られるとは限らない。生物の形態に及ぼす磁場の影響を検討した例として、Prasadら(1990)がヒョウガエルの卵に0.15T(6MHz)及び4.5T(191MHz)の磁場を暴露した報告がある。磁場を暴露することによる孵化率、奇形

発生率の変化を実験的に検討しているが、磁場を暴露しなかった対象群と有意差が見られなかったと報告している。しかし、Prasadらが使用したヒョウガエルは高等生物であり、系統などの個体間差を除去できていない可能性がある。これらの問題点を除去する方策の一つとして微生物を用いる方法が挙げられるが、前述したように微生物の増殖に関する報告はあるものの、スピルリナの増殖、形状変化に関する報告は見受けられない。

光合成を行う微細藻類を人工培養する場合、光照射方法、受光面積も重要な因子となる。新田(1986)は30-40リットルの培養槽でスピルリナを培養することにより、1日に人間が必要とする酸素を確保できると報告しているが、装置形状やスピルリナ濃度について記述していない。気泡塔型培養器で培養する場合、塔上部から光照射を行うことになる。スピルリナ濃度が大きい場合や気泡塔高が大きい場合、入射光と塔底に達する光の照度差が大きくなり光分布が増殖速度に大きな影響を及ぼす。スピルリナの生産効率を重視する場合、タイ王国のバンコク市郊外で稼働しているサイアムアルジェ社(Siam Algae Co., Ltd., 大日本インキ化学工業株式会社)の生産プラントのように受光面積を大きくし、かつ槽高を約10cm程度と小さくすることによって照度差を小さくする方法がとられる。一方、エネルギー効率を重視する場合は培養器底部の照度がほぼ0となるように操作する。

エネルギー効率を重視すると培養器内の照度分布が顕著になり、液循環に伴ってスピルリナに対して周期的に光が照射される。Vonshakら(1988), Wadaら(1983), Shyam and Sane(1989)は周期光を照射した場合についてスピルリナの光合成反応を分子レベルで解析している。一方、高野(1990)は通常植物の光合成速度が $20\text{mgCO}_2 \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 程度であるが明暗周期の間欠照射を行うと光合成速度が2倍以上になると記述し、宇宙基地での植物生産に取り入れたい技術としている。しかし、間欠照射の明暗周期に関する詳細な検討は行われていない。Materassiら(1984), Matsumotoら(1997), 中崎・秋山(1993), Zevenboom and Mur(1984)は酸素発生速度、増殖速度に及ぼす周期光の影響を検討しているが、光照射時間が1時間から23時間、1周期が24時間の周期光を用いている。一方で、Hieke and Neef(1989)は3種類の植物葉緑体に10msの閃光を150ms間隔で照射するとDCPIPの光還元量が最大になることを示している。Camacho-Rubio and Martinez-Sancho(1985)は*C.pyrenoidosa*に光照射時間6-600ms、遮光時間1-67msの光を照射した場合について、照度、光照射時間、遮光時間を用いた増殖モデルを提案して

いるが、彼らのモデルは周期光を照射した場合の明反応、暗反応のみから構成され、呼吸が組み込まれていない。Hoshinoら(1991)は連続光を照射しているスピルリナ懸濁液を強制対流によって混合したところ、混合効果が大きい条件ほど酸素発生速度が大きくなったと報告している。これはスピルリナの細胞が周期的な光照射を受けたことによる効果であると推論している。Ogawa and Terui(1972)はスピルリナ懸濁液に30秒間隔の明暗周期光を照射したが酸素発生に及ぼす周期光の効果は認められなかったと報告しており、周期光の効果は明らかにされていない。

2.2 微小重力下で使用する培養器に関する研究

これまでに考案された培養装置は地上1Gで開発された技術が基になっているが、地上1Gで培われた藻類培養法と異なる部分が多いため、培養法を再検討する必要がある。一方、地上1Gで培われた培養法をほとんどそのまま実現できる培養装置に関する検討は行われていない。宇宙ステーション内でスピルリナ培養を行うには、微小重力環境に適した気泡塔型の培養槽を開発する必要がある。地上1Gでは重力によって液体を容器内に貯蔵し、浮力(重力)によって気泡を分散させる。しかし、微小重力下では重力がほとんどなくなり、系内に作用する最大の力は表面張力となる。この状態ではわずかな外乱によって液体形状は容易に変化するため、通気による気液分散系の形成は困難である。

気泡塔型培養器を微小重力下で操作するには、いかなる外乱に対しても液体形状をほとんど一定に維持できること、気液分散系を作れることの2つが条件となる。柘植ら(1994)は微小重力下でオリフィスに気体を供給した場合について気泡成長を検討し、気液分散系をつくり出すために機械的な力を系に加える必要があると報告している。これは、浮力がほとんどなくなることによって、オリフィスに気泡が付着したまま成長するためであり、微小重力環境において気液分散系を作りだすためには重力に代わる表面張力よりも大きい力を系に与える必要がある。

Leslieら(1985)、Hungら(1989)は液体形状を一定に維持する力として、遠心力を用いている。遠心力によって液体は壁側に移動し、気体は回転中心に円筒状で存在する。Leslieら(1985)は無重力下において軸のない円筒容器を回転させることにより遠心力を与えた回転容器内の気液界面形状をシミュレートする式を導出し、さらに回転容器中のエタノール-空気系について、航空機による微小重力実験の結果とシミュレーション結果がほぼ一致することを確認している。Hungら(1989)は回転中心に軸を持つ円盤

形容器中の液体ヘリウムの気液界面形状を微小重力場(10^{-3} G以下)及び低重力場(10^{-1} - 10^{-2} G)についてシミュレートしている。微小重力場の場合、気液界面曲線はほぼ上下対称となり、Leslieら(1985)の式から求めた気液界面曲線とほぼ同じになる。低重力場の場合は気液界面曲線が上下非対称となる。両者で液体形状は若干異なるが一定に維持できているため、系に遠心力を与えることにより地上1Gで使用されている気泡塔型培養器に類似した培養系をつくれると予想される。しかし、地上1Gと同じ遠心力を系に与えるには装置が大型化するだけでなく、運転動力の増大をも招く。そこで、できるだけ小さく、かつ表面張力より大きい遠心力を与えることにより、液体形状を維持しながら気液分散系を作り出す必要がある。

また、宇宙ステーション内で活動する人間が多くなる場合、これに伴って装置を大型化する必要がある。Leslieら(1985)は液量率を一定として容器規模、容器縦横比を変化させた場合についてシミュレーション及び航空機実験を行っているが、想定または使用している液体がエタノールであり、水の場合と液物性が大きく異なる。これまで、水-空気系については実験的に検討されていない。

液体形状を一定に維持できれば、次に解決すべき問題は気液分散系の形成である。地上1Gの場合、液中に生成した気泡は浮力によって気液界面まで移動し、速やかに破裂する。微小重力下における液中での気泡成長・生成(例えば、柘植・寺沢,1993;柘植ら,1994; Kimら,1994)、気泡移動(例えば、奥沢ら,1995;土師・棚澤,1991;山本ら,1995)や気液分散系の形成(Jayawardenaら,1997)が検討されている。しかし、1Gよりも小さい遠心力場における気泡生成、移動、破裂について検討されていない。

特に気泡破裂については地上1Gにおいても研究が進んでいない。これまでに行われている研究で最も内容が近いものでも液液抽出系における液滴の合一時間に関する研究(Charles and Mason,1960; Gillispie and Rideal,1956;Jeffreys and Hawksley,1962,1965)である。しかし、ここで提案されている相関式の妥当性が確認されていない。今井・矢野(1997)は遠心力を利用して管内の気泡を回転中心に集合させられることを報告しているが、破裂に要する時間など気泡の破裂・除去に関する定量的な検討は行われていない。

気液分散系を形成するにあたり、系に遠心力を与える方法として培養器を回転させる方法(例えばLeslieら,1985)と培養器内の気液分散系を回転させる方法が考えられる。省エネルギーの見地から地上1Gにおける気泡塔型培養器と同様、通気エネルギーのみ

で系に遠心力を与えることができれば系に与える他の動力が不要になる。また、容器を固定できるので安全性が増すと考えられる。しかし、微小重力環境用の培養器を設計するために必要な基礎的データが十分取得されていない。

3. 本研究の目的

宇宙ステーション内などの閉鎖系微小重力環境において、人間活動によって生成する二酸化炭素を藍藻スピルリナの光合成能により酸素に変換するには培養環境の創成が必要である。微小重力環境にある容器内の気液系に1Gの遠心力を与えることができれば地上と同じ培養操作が可能であるが、培養装置の大型化や消費エネルギーの増大などデメリットが多い。1Gよりも小さい遠心力を気液系に与えることによって気液界面形状の制御及び気液分散系の形成を行い、培養装置の省エネルギー化、省スペース化を図る必要がある。しかし、気液系に作用する遠心力が重力よりも小さくなることに伴い、容器内の気液挙動は地上1Gと異なる可能性がある。遠心力を与えた容器内気液挙動を微小重力実験によって解明する必要がある。

本研究では、閉鎖系環境で必要になると思われるスピルリナ培養方法について地上1Gにおいて実験的検討を加えるとともに、高野(1990)が提案している周期光による酸素発生速度の向上について藍藻スピルリナを用いて実験的検討を行う。次に、落下による微小重力実験を行い、微小重力下において①容器を回転させる方式、②通気エネルギーを利用する方式の実験装置を用いて系に 10^{-1} G程度の小さい遠心力を与え、微小重力下において低遠心力を与えた容器内の気液界面形状の制御、及び気液分散系の形成条件について実験的に明らかにする。

4. 本論文の構成

本論文は8章から構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景、既往の研究、本研究の目的について述べた。

第2章では地上1Gにおいて藍藻スピルリナの培養法について実験的に検討し、増殖に及ぼす亜硝酸イオン初濃度、磁場の影響を明らかにした。

第3章では地上1Gにおいて藍藻スピルリナの酸素発生に及ぼす培養操作条件の影響について実験的に検討し、周期光を照射することによってスピルリナの酸素発生速度が向上すること等を明らかにした。

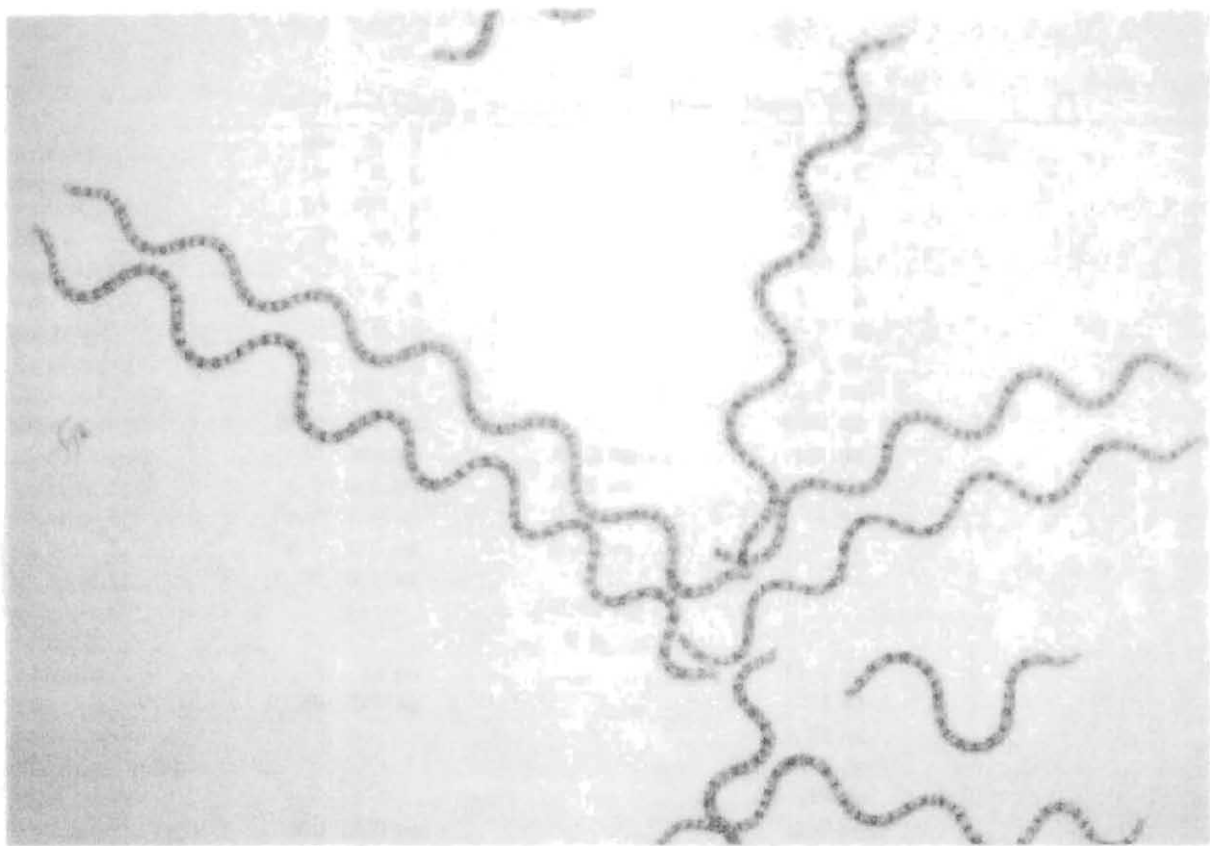
第4章では、微小重力下で藍藻スピルリナを培養するための培養環境形成法を検討した。微小重力下で気液系に 10^{-1} G程度の低遠心力を与えることにより、気液界面の形状制御が可能であること、即ち中空回転液層の形成が可能であることを明らかにした。

第5章では、前章の知見に基づき、微小重力下で低遠心力によって形成される中空回転液層の形成条件を明らかにし、形成可否を分割する境界線の定式化を行った。

第6章では、微小重力下において形成させた中空回転液層中の気泡挙動について実験的に検討した。中空回転液層中に生成させた気泡が気液界面に接触してから破裂するまでに要する時間を測定し、気泡破裂に要する時間に及ぼす遠心加速度の影響を明らかにした。

第7章では、固定容器に供給する気体の通気エネルギーを利用して系に遠心力を与える方式について実験的に検討した。中空回転液層を形成させる方法について実験的に検討し、気体の通気エネルギーによって中空回転液層の形成が可能であることを明らかにした。

第8章では、本論文で得られた新たな知見を総括した。



←→
100 μ m

生物学的分類：

藍藻植物門，ネンジュモ目，ユレモ亜目，ユレモ科，スピルリナ属

Fig. 1-1 *Spirulina platensis* IAM M-135 (Blue-green algae)

Table 1-1 乾燥スピルリナ成分表(100gあたり)

項目	含有量		
	リナグリーン(DIC)	Pecrapompisalら(1999)	Nakayaら(1988)
protein	55- 70 g	68.63 g	61.4 g
fat	6- 9 g	6.57 g	8.5 g
carbohydrate	15- 20 g	12.99 g	16.4 g
fiber	2- 4 g	7.38 g	3.0 g
dietary fiber			8.09 g
ash	6- 8 g	6.05 g	7.7 g
moisture	2- 5 g	5.76 g	3.0 g
carotenoid	240- 450 mg		321 mg
chlorophyll-a	900-1500 mg		1210 mg
phycocyanin	3500-7000 mg		5360 mg
provitamin A	80- 220 mg	40.3 mg	121 mg
vitamin B ₁	1.5- 3.5 mg	0.20 mg	1.98 mg
vitamin B ₂	3.0- 5.0 mg	2.17 mg	3.63 mg
vitamin B ₆	0.5- 1.0 mg	0.68 mg	0.59 mg
vitamin B ₁₂	0.08- 0.2 mg		0.11 mg
niacine		6.69 mg	
vitamin C		N. D.	
vitamin E	4- 12 mg		11.8 mg
inositol	50- 100 mg		74 mg
pantothenic acid			0.88 mg
nicotinic acid			13.2 mg
folic acid			0.042 mg
linolenic acid	900-1500 mg		1250 mg
oleic acid	700-1300 mg		
isoleucine		2810 mg	
leucine		4810 mg	
lysine		2070 mg	
methionine		1160 mg	
phenylalanine		2200 mg	
threonine		3200 mg	
tryptophan		810 mg	
valine		2810 mg	
alanine		3630 mg	
arginine		4170 mg	
aspartic acid		5770 mg	
cystine		680 mg	
glutamic acid		8740 mg	
glycine		2630 mg	
histidine		810 mg	
proline		1820 mg	
serine		3010 mg	
tyrosine		2160 mg	
Ca	100- 400 mg	1230 mg	
Fe	50- 100 mg	25.0 mg	
K	1000-2000 mg	510 mg	
Mg	200- 600 mg	390 mg	
Na		370 mg	
Mn		2.74 mg	
Zn		3.87 mg	
Cr		0.12 mg	
Cu		3.59 mg	
P		700 mg	
Co		N. D.	

Table 1-2 スピルリナとクロレラの比較

	<i>Spirulina platensis</i>	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>
分類	藍藻 (原核細胞, 下等微生物)	緑藻 (真核細胞, 高等微生物)
生息形態	集合体	単細胞
細胞サイズ	200-500 μ m	2-12 μ m
形状	らせん形	球形または楕円体
細胞分裂	1細胞→2細胞	1細胞→2~8細胞
消化吸収率	95%	60% 80%(超音波破碎処理)
至適pH	10	6
至適温度	30-40°C	25-35°C

1 緒言

工場からの燃焼排ガスなどの形で放出される二酸化炭素を微細藻類の光合成を利用して酸素に変換する方法が検討されている(Clementら,1980; Kobayashi and Fujita, 1997; Oguchiら,1989)。これまで、主に緑藻の*Chlorella* sp.や藍藻*Spirulina* sp.について研究が進められており、今後の研究もこの2種を中心に行われてゆくと予想される。しかし、藍藻*Spirulina* sp.は藻体が大きく収穫しやすい、また消化吸収率が高いなど多くの工学的、栄養学的利点を持っている。しかし、*S.platensis*を閉鎖系環境で培養する場合、空気中に含まれる窒素酸化物の影響や、人工培養を行う際に周辺機器から発せられる電磁波について詳細な検討が行われていない。燃焼排ガス等には二酸化炭素と共に微量の窒素酸化物が含まれている。小林・藤田(1996)は藍藻*S.platensis*を高濃度領域で培養する場合、硝酸イオンの不足により増殖速度が低下すると報告している。排ガスからの二酸化炭素供給に伴い窒素酸化物が溶解し、硝酸イオンが生成するため、これを利用すれば外部から補給していた硝酸イオン等の窒素源添加量を減らすことが可能になる。*S.platensis*の培養液は塩基性であり、培養液に窒素酸化物が溶解すると硝酸イオンと亜硝酸イオンが生成すると予想される。亜硝酸イオンは硝酸イオンと競合し、硝酸イオンの代謝を阻害することが藍藻*Anacystis nidulans*で報告されており(Maduenoら,1987)、属は異なるが同じ藍藻である*S.platensis*においても同様の現象が起こる可能性がある。一方、Matsumotoら(1997)は窒素源を硝酸塩から亜硝酸ナトリウムに置き換えた培養液や、一酸化窒素を含む模擬排ガスを用いて緑藻*Nannochloropsis salina*の培養を行い、*N.salina*の増殖に影響を及ぼさないこと、一酸化窒素の溶解により生成する亜硝酸イオンが窒素源として利用可能であると報告している。しかし、緑藻と進化の過程、細胞構造が異なる藍藻*S.platensis*では確認されていない。

また、地球上の生物は地球の持つ地磁気の影響を受けながら生活している。地磁気は日常的に使用する磁石などから発せられる地場よりも小さく、異常のある地域でも 10^{-4} Tオーダー(Kuboら,1987)である。そこで、生物に及ぼす磁場の影響について多くの研究者が検討を行っているが、Table2-1に示すように微生物の増殖やHuman cellのDNA構造に及ぼす磁場の影響等を検討した報告がほとんどである(例えば、Hiranoら, 1998; Fioraniら,1992; Okunoら,1993,1994; Takahashi and Kamezaki,1985)。生物の形態

に及ぼす磁場の影響を検討した例として、Prasadら(1990)がヒョウガエルの卵に0.15T(6MHz)及び4.5T(191MHz)の磁場を暴露した報告がある。磁場を暴露することによる孵化率、奇形発生率の変化を実験的に検討しているが、磁場を暴露しなかった対象群と有意差が見られなかったと報告している。しかし、Prasadらが使用したヒョウガエルは高等生物であり、系統などの個体間差を除去できていない可能性がある。これらの問題点を除去する方策の一つとして微生物を用いる方法が挙げられるが、前述したように微生物の増殖に関する報告はあるものの、形状変化に関する報告は見受けられない。一方、長期間にわたって人工培養を行うとらせん状のスピルリナに混じって直線状藻が生育してくる。Yanagimoto and Saitoh(1981,1982)はスピルリナ培地中に存在する直線状藻について検討を行い、スピルリナは培養中にしばしば崩れたらせん形を示すとしながらも直線状藻は*Oscillatoria*属の近縁種とみなしている。Bourrelly(1970)は*Spirulina*属を*Oscillatoria*属の亜種としており、その違いはさほど明確ではない(Yanagimoto and Saitoh,1981)。しかし、従来食飼料の対象としてきた藻体はスピルリナであることから、直線状藻とスピルリナの混合培養系から直線状藻を減少させることが望ましい。スピルリナの単離は、ピペット洗浄法によって行われる(1981)。この方法は熟練を必要とし、大量のスピルリナを得るには長期間を要する。そのため、工業的に大量培養を行う場合の種母スピルリナを得る方法として、必ずしも適しているとはいえない。

本章では、スピルリナの基本的なデータとして、まず、スピルリナの増殖速度に及ぼす照度の影響を検討した。次いでスピルリナの増殖速度に及ぼす亜硝酸イオン初濃度の影響を実験的に検討した。また、培養に用いる周辺機器類が発する磁場や地磁気よりも大きい磁場をスピルリナに暴露するため、ネオジム磁石を培養液中に入れ、磁場内で培養中のスピルリナの形状を定期的に観察することにより、スピルリナの形状変化に及ぼす磁場の影響を実験的に検討した。次いで、培養液中の CaCl_2 濃度を極端に減少させることにより、直線状藻及びスピルリナの混合培養系から直線状藻のみを簡単に除去する方法を検討した。

2 実験装置及び方法

(a) 供試藻体

供試藻体として入射光照度4klxの連続光で14日間前培養した藍藻*Spirulina platensis*

を、標準培養液としてTable2-2に示す炭酸ナトリウム、炭酸水素ナトリウム、硝酸ナトリウムを主成分とする水溶液を用いた。このスピルリナは10年以上の長期培養により、直線状藻が混在している。この直線状藻は形状以外スピルリナと酷似しているものの、正体が不明である。そこで、らせん形を維持しているスピルリナを寒天培地を用いて以下の方法(Fig.2-1)で単離した。

寒天培地はTable2-3に示した2つの水溶液をオートクレーブにより滅菌(0.1MPa, 393 K, 15分)し、両溶液を等量ずつ混合した後、滅菌済みプラスチックシャーレに入れ、クリーンルーム内で1昼夜放冷したものを用いた。直線状藻の混在している懸濁液を通常濃度の培養液で希釈した後、寒天培地上に散布した。クリーンルーム内で一昼夜放置し、寒天培地上のらせん形を維持しているスピルリナのみを摘出した。

(b) スピルリナの増殖速度

前培養したスピルリナを標準培養液により希釈し、測定用サンプルとした。前培養用装置の概略図をFig.2-2に示す。前培養はル式培養瓶を用いてスピルリナの培養を行い、入射光照度 I_0 は4klx、操作液体積は $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 、測定温度は303Kで一定とした。Fig.2-3に増殖速度測定用装置の概略図を示す。操作液体積は $6 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 、スピルリナ初濃度は $10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下とした。スピルリナが沈殿しないように通気を行った。入射光照度 I_0 は0-100klxの範囲で変化させた。

スピルリナの増殖速度を測定するため、角形セル(20mmx20mm)に希薄スピルリナ懸濁液を入れ、キセノンランプ(ウシオ電機製)及び市販の蛍光灯で光照射した。スピルリナ濃度は波長560nmにおける懸濁液の吸光度を測定し、あらかじめ作成しておいた検量線から算出した。

(c) 亜硝酸イオン初濃度の影響

Table2-2に示した標準培養液に亜硝酸ナトリウム初濃度が0.0-1.6 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ の範囲になるように添加して用いた。実験装置はFig.2-3で示した装置と同様である。操作体積は $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 、入射光照度は4klx、測定温度は303Kで一定とした。

スピルリナ濃度は波長560nmにおける懸濁液の吸光度を測定し、あらかじめ作成しておいた検量線から算出した。亜硝酸及び硝酸イオン濃度は、遠心分離機(3000rpm, 20分)によりスピルリナを除去した上澄液を試料とし、JIS K0102工業排水試験方法に準じて、亜硝酸イオン濃度はナフチルエチレンジアミン吸光光度法、硝酸イオンはイオンクロマトグラフィーにより測定した。

(d) スピルリナの単離と直線状藻の除去

種母として標準培養液に1カ月毎に植え継ぎ、5年間培養したスピルリナを用いた。Fig.2-4(a)に種母スピルリナの写真を示す。実験装置はFig.2-3で示した装置と同様である。実験にはル式培養瓶を用い、照度は4.5klx、温度は303K、操作体積 $4 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 、スピルリナ初濃度は $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ で一定とした。空気流量 $3 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ で通気を行い、液を混合した。pHを9.8に制御するため、適宜 CO_2 を吸収させた。

サンプリングは定期的に行い、浮遊物、沈澱物を採取しないよう留意した。藻体濃度は波長560nmの吸光度から求めた。また、顕微鏡を用いて直線状数藻及びスピルリナ数を計数し、スピルリナの存在比を算出した。

3 実験結果及び考察

3-1 スピルリナの増殖速度

まず、研究を進めるに当たり最も基本的なデータとなるスピルリナの増殖速度を実測した。一般的に、微生物の増殖速度はMonod型増殖速度式で表される。スピルリナをTable2-2に示した標準培養液で培養した場合、制限基質は培養液中の無機塩類ではなく光であるため、比増殖速度は次式で表される。

$$\mu = \mu_m \frac{I}{K_i + I} \quad (2-1)$$

培養液に溶解している物質が基質の場合、攪拌翼や気泡流動による液混合によって、基質は容器内に均一分散しているとみなせる。しかし、光が基質となる場合、入射光は溶液を通過する際に吸収・散乱により照度が徐々に小さくなる。ここで生じる光分布はLambert-Beerの式で表すことができる。

$$I = I_0 \exp(-AXL) \quad (2-2)$$

この光分布のため、大腸菌などの従属栄養細菌と異なる増殖挙動を示す。藍藻スピルリナをはじめとする光独立栄養微生物の増殖速度 dX/dt は次式で定義される。

$$\frac{dX}{dt} = \int_0^L \mu X dL \quad (2-3)$$

Eqs.(2-1),(2-2)をEq.(2-3)に代入し、積分して整理すると次式が得られる。

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu_m}{AL} \ln \left\{ \frac{(K_i/I_0)+1}{(K_i/I_0)+\exp(-AXL)} \right\} \quad (2-4)$$

ここで、微生物の濃度 X が小さく、かつ入射光照度 I_0 が十分大きい場合、

$$\exp(-AXL) = 1 - AXL$$

$$(K_L/I_0)+1=1$$

とみなせるため、増殖速度は次式で近似できる。

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m X \quad (2-5)$$

これは微生物一般に見られる対数増殖期を示し、スピルリナ濃度が小さい実験初期では、スピルリナの増殖が指数関数的に進行することを示している。

一方、微生物濃度 X が十分大きい場合、

$$(K_L/I_0)+\exp(-AXL)=(K_L/I_0)$$

と近似できる、増殖速度は次式で近似できる。

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu_m}{AL} \ln \left(1 + \frac{I_0}{K_L} \right) \quad (2-6)$$

これは、光独立栄養微生物などで見られる直線増殖期を示す。Eq.(2-6)から、スピルリナが増殖し、スピルリナ濃度が高くなるとスピルリナ濃度に関係なく設計・操作条件によって増殖速度が決定することを示している。また、同時に系が決まればスピルリナの増殖速度は一定であり、スピルリナ濃度が直線的に増加することを示している。

まず、標準培養液の吸光係数 A を測定する。ル式培養瓶($L=0.057\text{m}$)にスピルリナ濃度既知の懸濁液を入れ、入射光強度 I_0 、通過光強度 I を測定した。Eq.(2-2)を次式のように変形し、スピルリナ濃度 X に対して左辺をプロットした。

$$\frac{1}{L} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) = AX \quad (2-7)$$

結果をFig.2-5に示す。プロットに若干バラツキがあるが、直線で近似すると、直線の傾きより吸光係数 A は $110\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ となった。

次に、スピルリナの増殖速度を測定するにあたり、Eq.(2-1)が適用できるよう、スピルリナ濃度をできるだけ小さくした。Fig.2-6に各照度におけるスピルリナ濃度の経時変化を示す。各照度とも時間の経過と共にスピルリナ濃度は増加した。これらのデータを用いてEq.(2-5)のLine-weaverプロット(Fig.2-7)から最大比増殖速度 μ_m 及び飽和定数 K_L を求めたところ、次の値となった。

$$\mu_m = 2.6 \text{ d}^{-1}$$

$$K_L = 8.3 \text{ klx}$$

スピルリナに対する既報文(Clementら,1980; Huang and Chen,1986; Leeら,1987; Ogawa and Terui,1972)の値は、最大比増殖速度 μ_m が $2.0\text{--}3.9\text{d}^{-1}$ 、飽和定数 K_L が $1.5\text{--}10 \text{ klx}$ の範囲であり、本実験結果から求めた値は既報文の値の範囲内にある。

3-2 スピルリナの増殖速度に及ぼす亜硝酸イオン初濃度の影響

燃焼排ガス中の二酸化炭素をスピルリナによって固定する際に同伴される窒素酸化物の影響を調べるため、亜硝酸ナトリウムを添加した標準培養液によってスピルリナの培養を行い、スピルリナの比増殖速度に及ぼす亜硝酸イオン初濃度の影響を実験的に検討した。

一例として亜硝酸イオン初濃度 $0.0, 0.32, 0.65, 0.81 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ で培養した場合のスピルリナ増殖曲線をFig.2-8に示す。スピルリナ濃度は時間の経過と共に増加し、4日目以降はほぼ直線的に増加した。亜硝酸イオン初濃度が $0.32, 0.65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ の場合、同時刻におけるスピルリナ濃度が亜硝酸イオン無添加の標準培養液の場合よりも大きくなった。しかし、亜硝酸イオン初濃度が $0.81 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ の場合は、亜硝酸イオン無添加の標準培養液の場合よりもスピルリナ濃度が小さくなった。このことから、少量の亜硝酸イオンの存在はスピルリナの増殖を促進することがわかった。

Fig.2-9に硝酸イオン(白key)、亜硝酸イオン(黒key)濃度の経時変化を示す。硝酸イオンは時間の経過とともに直線的に減少した。亜硝酸イオン初濃度が小さくなるほど硝酸イオン濃度は大きく減少し、硝酸イオン初濃度 $2.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ に対して12日目に $1.8-2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ となった。亜硝酸イオン濃度は亜硝酸イオン初濃度が大きいものほど減少しており、硝酸イオンとともに亜硝酸イオンが窒素源として利用されていると推測される。これらの結果は、藍藻*A. nidulans*の硝酸イオン及び亜硝酸イオンの代謝が競合するというMaduenoら(1987)の報告と一致する。なお、亜硝酸イオン無添加の標準培養液で培養を行った場合、実験期間中に亜硝酸イオンは検出されなかった。これは、硝酸イオンが亜硝酸イオンに還元される反応過程が律速段階であることを示唆している。

スピルリナ濃度が $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 未満(概ね2,3日目まで)のデータから次式で比増殖速度を求めた。

$$\mu = \frac{1}{t} \ln \frac{X}{X_0} \quad (2-8)$$

Fig.2-10に比増殖速度に及ぼす亜硝酸イオン初濃度の影響を示す。また、同図中にはEq.(2-1)に最大比増殖速度、飽和定数の値を代入して算出した亜硝酸イオン無添加の標準培養液の比増殖速度を●で示した。亜硝酸イオン初濃度の増加に伴い比増殖速度は大きくなった。亜硝酸イオン初濃度 $0.3-0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 付近で比増殖速度は最大となり、無添加の場合に比べて約1.3倍となった。さらに亜硝酸イオン初濃度を大きくすると比増殖速度は小さくなり、亜硝酸イオン初濃度が約 $0.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上の場合では亜硝酸イ

オン無添加の標準培養液の場合よりも小さくなった。これより、亜硝酸イオン初濃度が $0.8\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下であれば増殖に悪影響を及ぼさないことがわかった。

前述したように硝酸イオンが亜硝酸イオンに還元される反応が律速となっている。亜硝酸イオンの添加は律速段階である硝酸還元反応を必要としなくなるため、亜硝酸イオン濃度が $0.0\text{--}0.8\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ の範囲では、比増殖速度が大きくなったと考えられる。一方、亜硝酸イオン濃度が約 $0.8\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ よりも大きい場合は前述の促進効果よりも亜硝酸イオンによる阻害が顕著になる。亜硝酸イオンの代謝速度が小さくなり、比増殖速度が小さくなったと考えられる。これは亜硝酸イオンを基質とした基質阻害モデルでも定性的に説明できる。

次にMatsumotoら(1997)の結果と本実験結果の比較を行う。Matsumotoらは緑藻 *Nannochloropsis salina* の培養で窒素源として硝酸ナトリウムを亜硝酸ナトリウムに置き換えた培養液による培養法や、培養液に一酸化窒素ガスを含む模擬排ガスを供給する培養法で *N. salina* の増殖に及ぼす亜硝酸ナトリウム、一酸化窒素の影響を検討し、増殖に及ぼす悪影響はなかったと報告している。Matsumotoらは窒素源を硝酸ナトリウムから亜硝酸ナトリウムに置き換えた培養液を用いているが、培養液に含まれる亜硝酸イオンは初濃度で約 $0.045\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ であり、本実験条件の亜硝酸イオン初濃度範囲に比べて著しく小さい。また、模擬排ガスを供給した場合についても、亜硝酸イオン濃度は時間の経過と共に徐々に増加したが、最大濃度で $0.04\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 程度であったとしている。Matsumotoらが使用した藻体は緑藻 *N. salina* であるため、*S. platensis* の増殖に及ぼす亜硝酸イオン濃度の影響を直接比較することは困難であるが、Matsumotoらが行った実験範囲では亜硝酸イオン濃度が極端に小さく、*N. salina* の増殖に及ぼす亜硝酸イオンの影響が現れにくい条件であったと推定される。

3-3 スピルリナ懸濁液からの直線状藻の除去

種母はFig.2-4(a)に示すように、5年間の培養でほとんどが直線状藻となっている。標準培養液を用いてスピルリナの培養を行った場合、スピルリナの存在比 R_s (全藻体数に対するスピルリナ数 $=0.1\text{--}1.0$)に関係なく、増殖速度は同じであった。なお、培養期間中、存在比 R_s は初発存在比と等しく一定であった。このことから、直線状藻はスピルリナの変異体であると予想される。スピルリナの遺伝子発現に何らかの外乱が加わり、らせん形を維持するタンパク質合成が変化したものと推定し、タンパク質の合成・代謝に関係が深いと思われるカルシウムに注目した。

まず、初発 CaCl_2 濃度を極端に減少させた標準培養液に直線増殖期後期の種母スピルリナを植種して培養を行った。Fig.2-11に藻体濃度 X 及びスピルリナの存在比 R_s の経時変化を示す。なお、培養中の CaCl_2 濃度を測定した結果、初発 CaCl_2 濃度と同じであった。培養液の初発 CaCl_2 濃度と標準培養液の初発 CaCl_2 濃度の比 R を0.16,0.32とした場合、藻体濃度の増加は標準培養液($R=1$)の場合に比べて小さく、増殖が抑制された。 $R=0.16,0.32$ の場合、スピルリナの存在比は時間の経過とともに増加し、6日目に0.95以上となった(Fig.2-4(b))。しかし、 $R=0.16$ の場合、藻体濃度とスピルリナの存在比の積として試算したスピルリナ濃度 XR_s は5日目以降減少した。 $R=0.64$ の場合、藻体濃度及びスピルリナの存在比は $R=1$ の場合と同様の挙動を示し、直線状藻の除去は行われなかった。このことから、直線状藻の除去に適した初発 CaCl_2 濃度比 R は0.32であると思われる。

$R=0.32$ の場合、培養開始後3日目に最大直径3mm程度の緑色球状物体が培地中に認められた。顕微鏡観察を行った結果、Fig.2-4(c)のように、網目状物質(未同定)により直線状藻が捕捉されており、スピルリナを含まないことがわかった。直線状藻の凝集体は数を増しながら徐々に褐変した。褐変した凝集体の顕微鏡写真をFig.2-4(d)に示す。培養開始後6日目までに凝集体は培養瓶内で沈澱し、培地内に存在する直線状藻が除去された。 $R=0.16$ の場合も同様であった。そこで、 $R=0.32$ で固定し、直線状藻の除去に及ぼす種母スピルリナの増殖活性の影響を検討した。直線増殖期の初期及び中期の種母スピルリナを植種した場合、直線状藻は除去されなかった。一方、定常期の種母スピルリナを植種すると直線状藻が沈澱除去され、Fig.2-11, $R=0.32$ とほぼ同じデータが得られた。上記の培養で得られたスピルリナを標準培養液に植種し、再培養を行った。 $R=1$ の場合と同様の増殖挙動を示したことから、増殖活性が回復していることがわかった。

以上の結果より、初発 CaCl_2 濃度を標準培養液の0.32倍とし、かつ、直線増殖期の後期以降の種母スピルリナを植種した場合、直線状藻及びスピルリナの混合培養系から直線状藻を沈澱除去できることがわかった。

3-4 磁気暴露によるスピルリナの直線化

直線状藻がスピルリナの突然変異体であると予想したが、スピルリナ培養液には突然変異を引き起こす物質は含まれていない。また、放射線源なども周囲に存在しないことから原因を調査した。その結果、恒温槽のヒーターや蛍光灯から微弱な磁場が発

生していることがわかった。そこで、スピルリナに対してネオジム磁石による磁場暴露を行った。スピルリナ存在比の経時変化をFig.2-12に示す。48日目のスピルリナ存在比は0.20であり、55日目にはらせん形を維持しているスピルリナが殆ど確認されず、スピルリナ存在比はほぼ0となった。このことから、直線状藻はスピルリナが磁場暴露によって変異した藻体であることが確認された。さらに培養を継続したところ、スピルリナ存在比は0.01-0.03程度で変動したが、増加しなかった。以上のことから、スピルリナは磁場暴露によってらせん状から直線状へ形状が変化し、その形状変化は不可逆的であることがわかった。スピルリナに磁場暴露を行わなかった場合、実験開始から20日目に直線状藻が確認され、スピルリナ存在比が約0.9に低下したが、その後はスピルリナ存在比が0.90-0.97の間で推移し、約400日間のスピルリナ存在比0.9以上を維持した。このことから、スピルリナの場合、ネオジム磁石による磁場暴露を行わなくても若干の直線状藻が発生することがわかった。

以上の結果より、スピルリナに磁場暴露することによりスピルリナのらせん形状が直線状に変化することがわかった。

4 本章の結論

スピルリナの基本的なデータとして、スピルリナの増殖速度に及ぼす照度の影響を検討した。その結果、スピルリナの増殖は光を基質としたMonod型増殖速度式で表現することができた。次に亜硝酸イオン初濃度 $0.0\text{--}1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ の培養液を用い、スピルリナの増殖に及ぼす亜硝酸イオン初濃度の影響を実験的に検討した。また、長期間培養したスピルリナ懸濁液中に発生する直線状藻の除去、及びスピルリナに対する磁気暴露実験を行った。さらに、スピルリナによる食糧供給を行うためのモデルを構築した。これらの結果から以下のことがわかった。

- (1) 標準培養液の吸光係数 A は $110\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 、スピルリナの最大比増殖速度 μ_m は 2.6d^{-1} 、飽和定数 K_L は 8.3klx であった。
- (2) 亜硝酸イオンを添加していない標準培養液で培養した結果と比較して、亜硝酸イオン初濃度が約 $0.8\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下の場合ではスピルリナの比増殖速度が大きくなり、亜硝酸イオン初濃度 $0.3\text{--}0.4\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 付近で比増殖速度は約1.3倍になった。
- (3) 亜硝酸イオン初濃度が約 $0.8\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上の場合、亜硝酸イオンによりスピルリナの増殖が阻害され、比増殖速度は低下した。

- (4) 初発CaCl₂濃度を標準培養液の0.32倍とし、かつ、直線増殖期の後期以降の種母スピルリナを植種することにより、長期間培養により発生した直線状藻をスピルリナ懸濁液中から沈澱除去できることがわかった。
- (5) ネオジム磁石によってスピルリナに磁場暴露し、形状変化に及ぼす磁場の影響を検討した。スピルリナの形状がらせん状から直線状に変化した。

Author	Year	Strain	Medium	Light	Temp.	Remarks
Watanabe et al.	1979	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1980	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1981	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1982	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1983	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1984	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1985	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1986	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1987	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1988	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1989	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1990	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1991	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1992	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1993	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1994	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1995	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1996	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1997	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1998	1740	(10000)			
Watanabe et al.	1999	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2000	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2001	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2002	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2003	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2004	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2005	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2006	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2007	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2008	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2009	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2010	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2011	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2012	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2013	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2014	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2015	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2016	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2017	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2018	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2019	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2020	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2021	1740	(10000)			
Watanabe et al.	2022	1740	(10000)			

Table 2-1 磁場の影響に関する既往の報文

研究者 (発表年)	供試細胞	磁束密度 (周波数)	影響	備考
Takahashi <i>et al.</i> (1985)	<i>Chlorella</i> sp.	0-400G 580G	比増殖速度にほぼ影響なし 比増殖速度が低下	低照度, 低 CO ₂ でさらに阻害
Okuno <i>et al.</i> (1993)	<i>Eschericia coli</i>	117kG (0Hz)	30-38 °C で増殖促進, Glu 濃度 0.1-100mM/l で促進	L 培地と VB 培地で若干異なる
Hirama <i>et al.</i> (1989)	<i>E.coli</i> IFO-3301	8400G (?Hz)	デスロ培地でカウント、菌数が減少	循環処理 循環時間約 60 秒 (推定)
Blankenship <i>et al.</i> (1977)	<i>R.sphaeroides</i> R-26	0-2kG (0Hz)	カロチノイド (色素) の生産が減少	温度 80-310K で検討、高温ほど減少 * <i>Rhodospseudomonas</i>
Moore (1979)	<i>C.albicans</i> <i>P.aeruginosa</i>	150,300G (0Hz)	増殖促進 増殖阻害	* <i>Candida</i> , <i>Pseudomonas</i>
Moore (1979)	5 種類	0-200G 300-900G (0.3Hz)	種類に関係なく増殖促進 種類に関係なく増殖阻害	<i>C.albicans</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>P.aeruginosa</i> , <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Halobacterium halobium</i>
Ramon <i>et al.</i> (1981)	<i>E.coli</i>	30G (60,600Hz)	60 時間後の菌数が 40% 減	細胞壁 (?) が破壊
Ramon <i>et al.</i> (1987)	<i>B.subtilis</i>	8-25G (0.8-1kHz)	増殖促進	
Greenbaum (1994)	<i>Vibrio fischeri</i>	13G (50Hz)	酵素活性などの差は 1% 未満	
Prasad <i>et al.</i> (1990a)	<i>Mycoplasma</i> sp.	23.5kG (100MHz)	Natural killer cell の細胞毒性増加	
Bessyo <i>et al.</i> (1992)	<i>Caenorhabditis elegans</i>	12kG (60Hz) 孵化前 48 時間	産卵開始時間に遅れ、産卵数約 9% 減少 受精卵形成に遅れ	<i>C.elegans</i> は線虫 磁気処理は 10 分間, 3 時間毎
Prasad <i>et al.</i> (1990b)	leopard frog	1.5kG (6MHz) 45kG (191MHz)	孵化率, 奇形発生率とも有意差なし	leopard frog= ヒョウガエル
Cridland <i>et al.</i> (1996)	human fibroblast	0.02-200G (50Hz)	thymidine 吸収約 5% 減少	
Liboff <i>et al.</i> (1984)	human fibroblast	0.16G (76 ± 4Hz)	thymidine の吸収が増加	
Cantoni <i>et al.</i> (1995)	CHO CCRF-C, MC Coy's cell	0.002-2G (50Hz)	DNA Single strand breaks の回復阻害	Single strand breaks は H ₂ O ₂ で生成
Fiorani <i>et al.</i> (1992)	human cell	0.002-2G (50Hz)	DNA の構造, 機能に影響なし	

Table 2-2 Medium composition for *S.platensis*

Na_2CO_3	11.3	g/l
NaHCO_3	9.7	g/l
NaNO_3	3.0	g/l
Na_2SO_4	2.2	g/l
KCl	0.5	g/l
K_2HPO_4	0.5	g/l
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.4	g/l
$\text{EDTA} \cdot 2\text{Na} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.078	g/l
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.053	g/l
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.005	g/l
A_8	2	ml/l
B_3	2	ml/l

A_8

H_3BO_3	2.81	g/l
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.81	g/l
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.22	g/l
$\text{Cr}_2\text{K}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	0.096	g/l
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.079	g/l
$\text{Ti}_2(\text{SO}_4)_3$	0.068	g/l
$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.048	g/l
$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.044	g/l

B_3

NH_4VO_3	0.023	g/l
$\text{Na}_2\text{WO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.018	g/l
MoO_3	0.015	g/l

Table 2-3 Agar medium composition for *S.platensis*

•Solution 1

Na_2CO_3	22.6	g/l
NaHCO_3	19.4	g/l
NaNO_3	6.0	g/l
Na_2SO_4	4.4	g/l
KCl	1.0	g/l
K_2HPO_4	1.0	g/l
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.8	g/l
$\text{EDTA} \cdot 2\text{Na} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.156	g/l
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.106	g/l
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.010	g/l
A_8	4	ml/l
B_3	4	ml/l

•Solution 2

Agar	15	g/l
------	----	-----

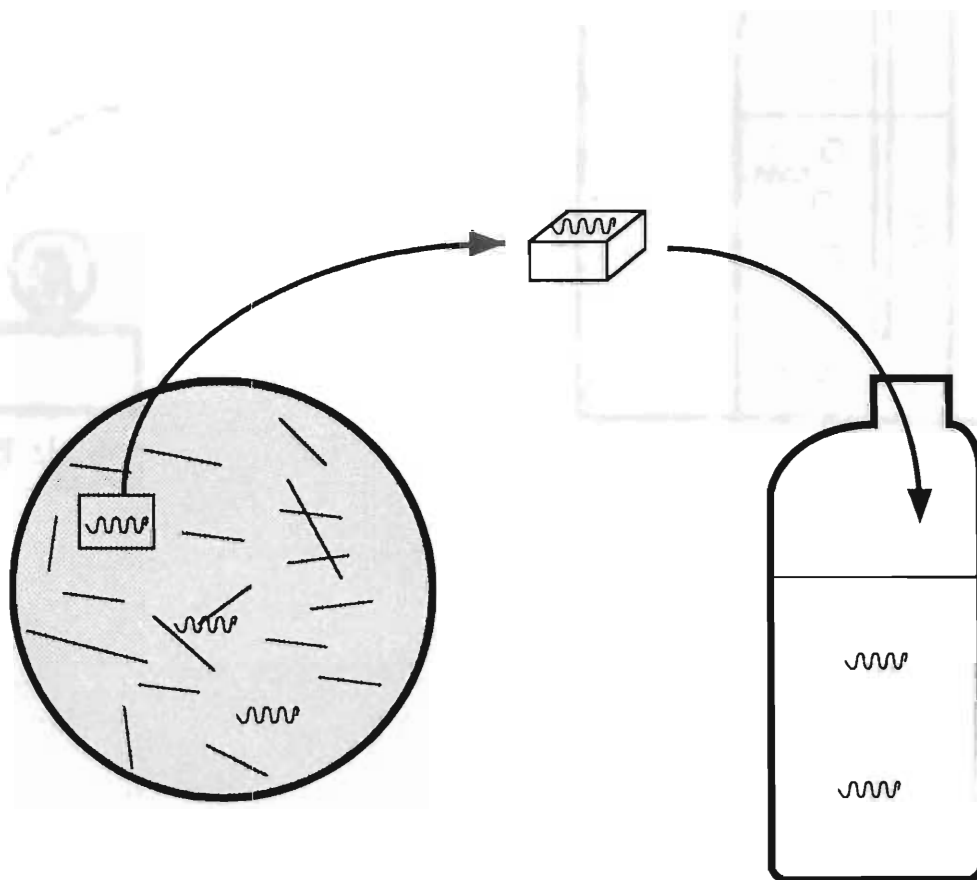
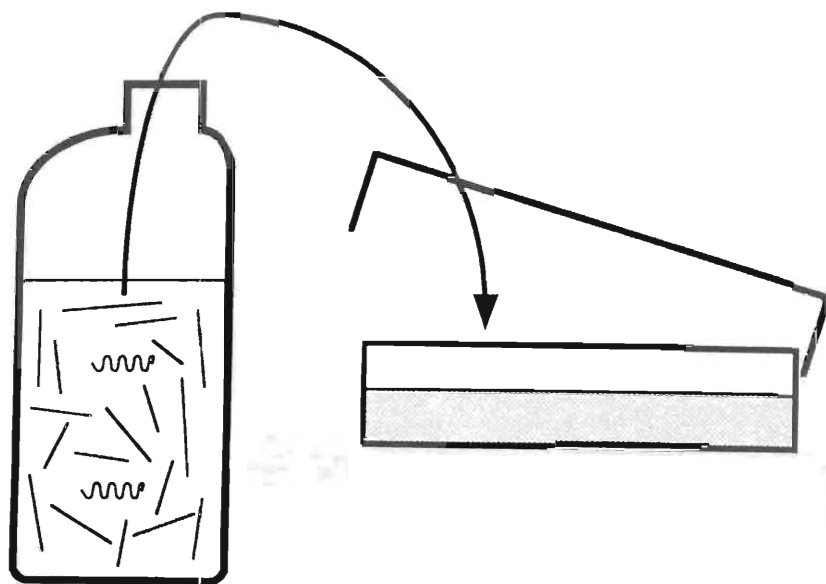


Fig.2-1 *Spirulina* separation method

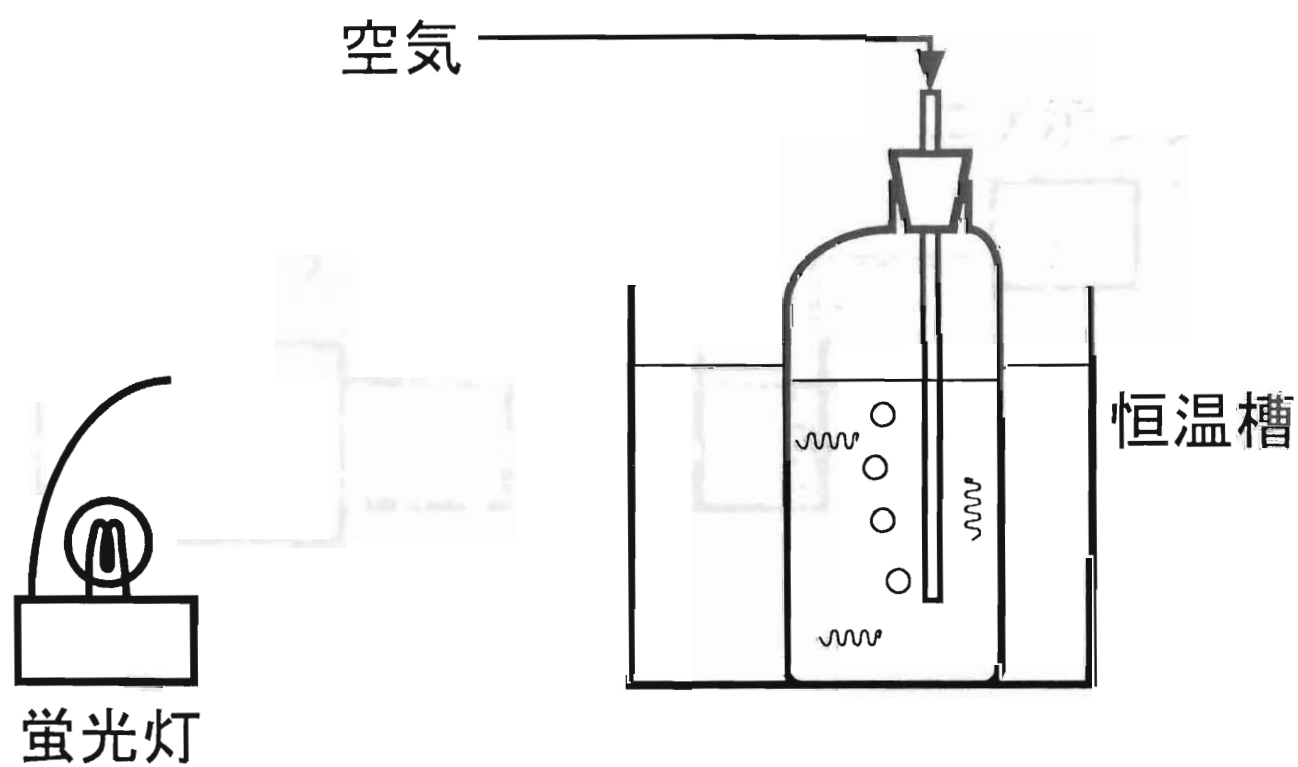
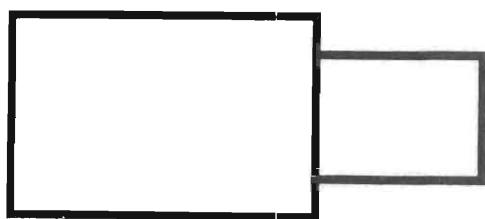
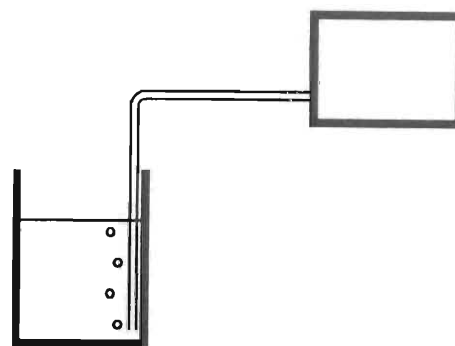


Fig.2-2 Experimental apparatus for pre-cultivation

キセノンランプ

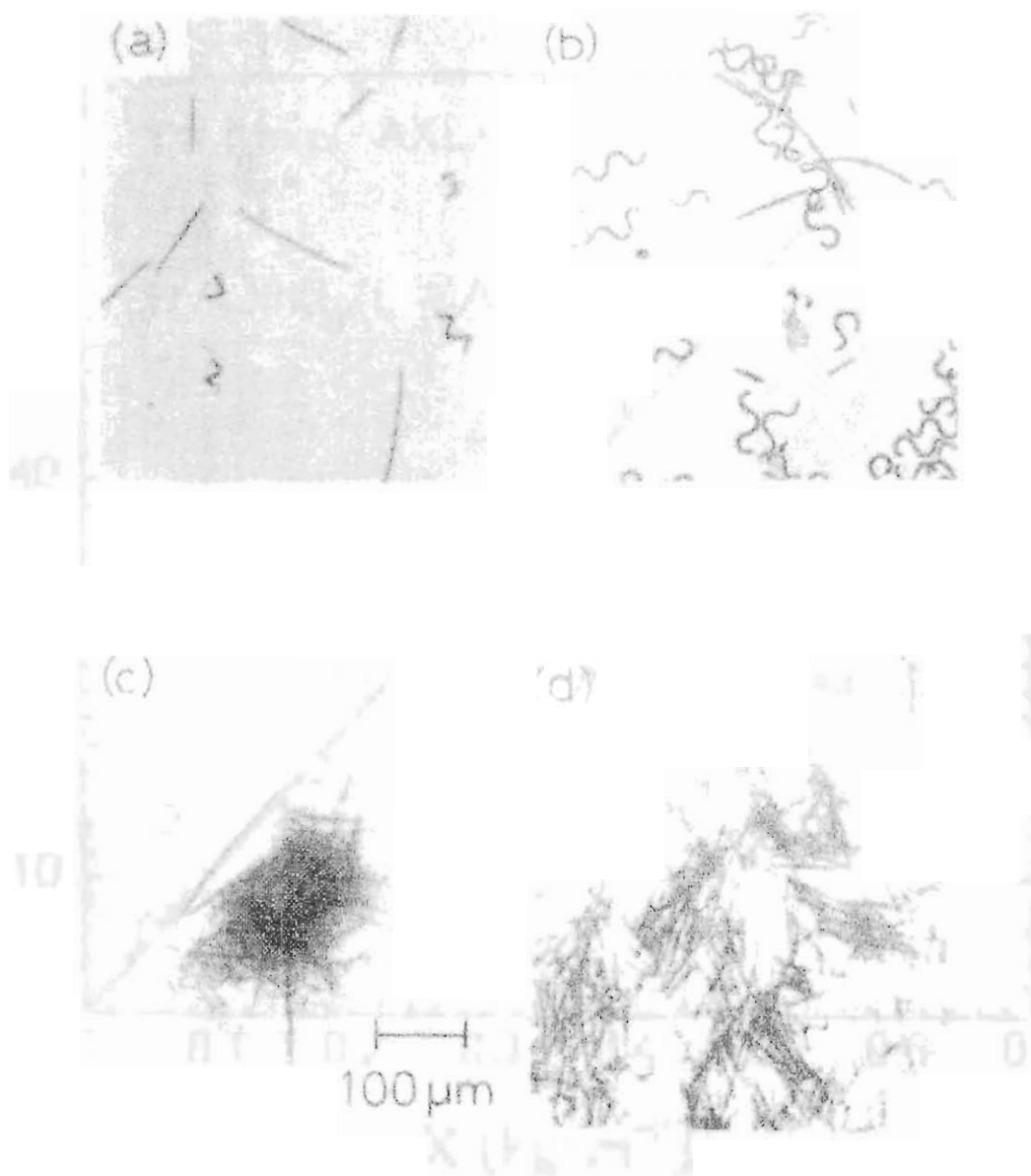


エアポンプ



(a) The *S. platensis* culture medium is prepared by adding 10 ml of 1% NaOH solution to 100 ml of 0.1% NaOH solution (pH 7.0-7.5).
 (b) Suspended flask of *S. platensis* culture medium.
 (c) Precipitated flask of *S. platensis* culture medium.

Fig.2-3 Experimental apparatus for measuring growth rate of *S. platensis*



- (a) The *Spirulina* culture during the long term artificial cultivation
 (b) *Spirulina* in the culture reduced CaCl_2 concentration ($R=0.32$, $t=5\text{d}$)
 (c) Suspended flock of linear algae ($R=0.32$, $t=3\text{d}$)
 (d) Precipitated flock of linear algae ($R=0.32$, $t=5\text{d}$)

Fig. 2-4 Photographs of the *Spirulina* Culture

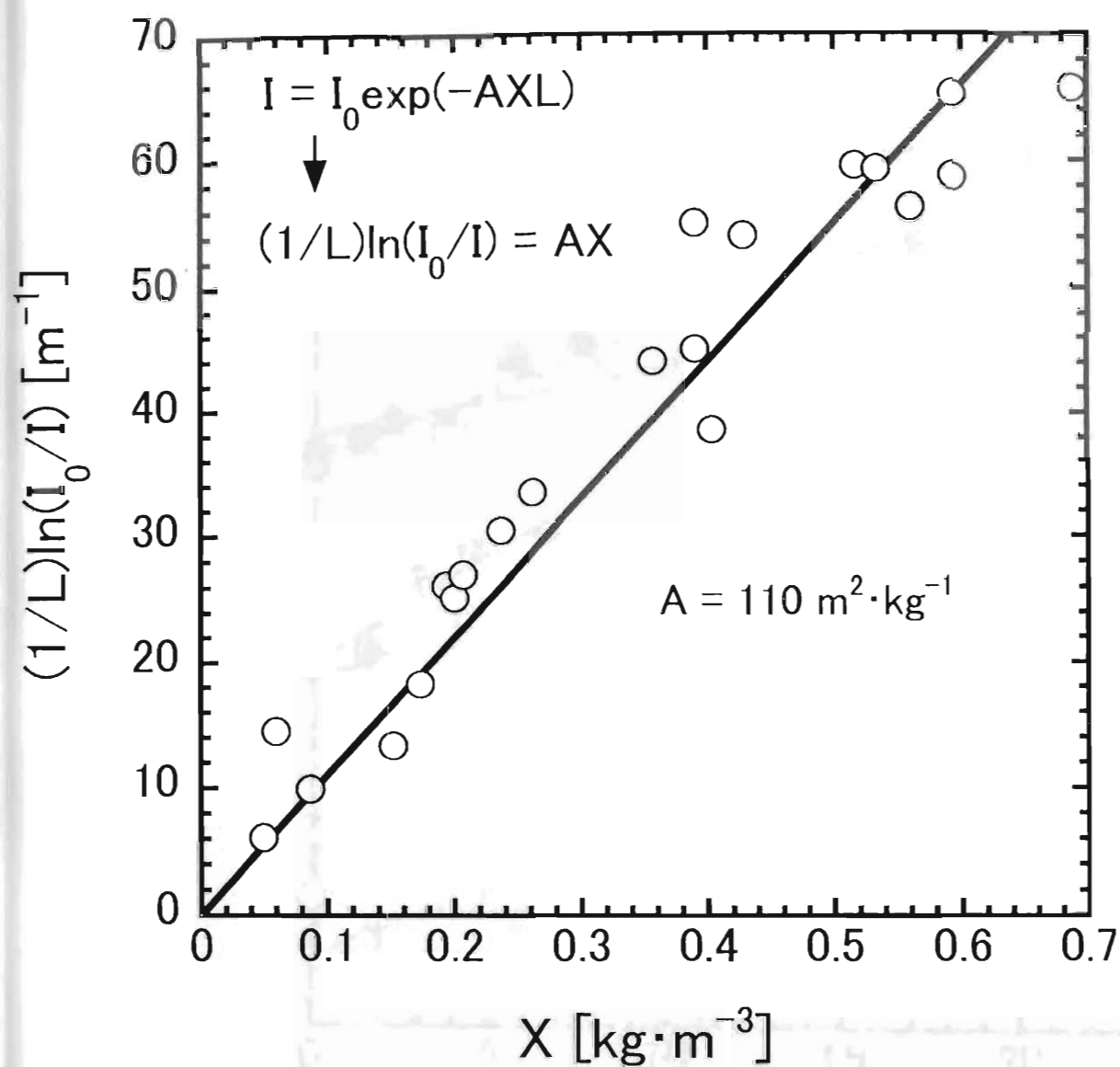


Fig.2-5 Determination of absorbed coefficient A

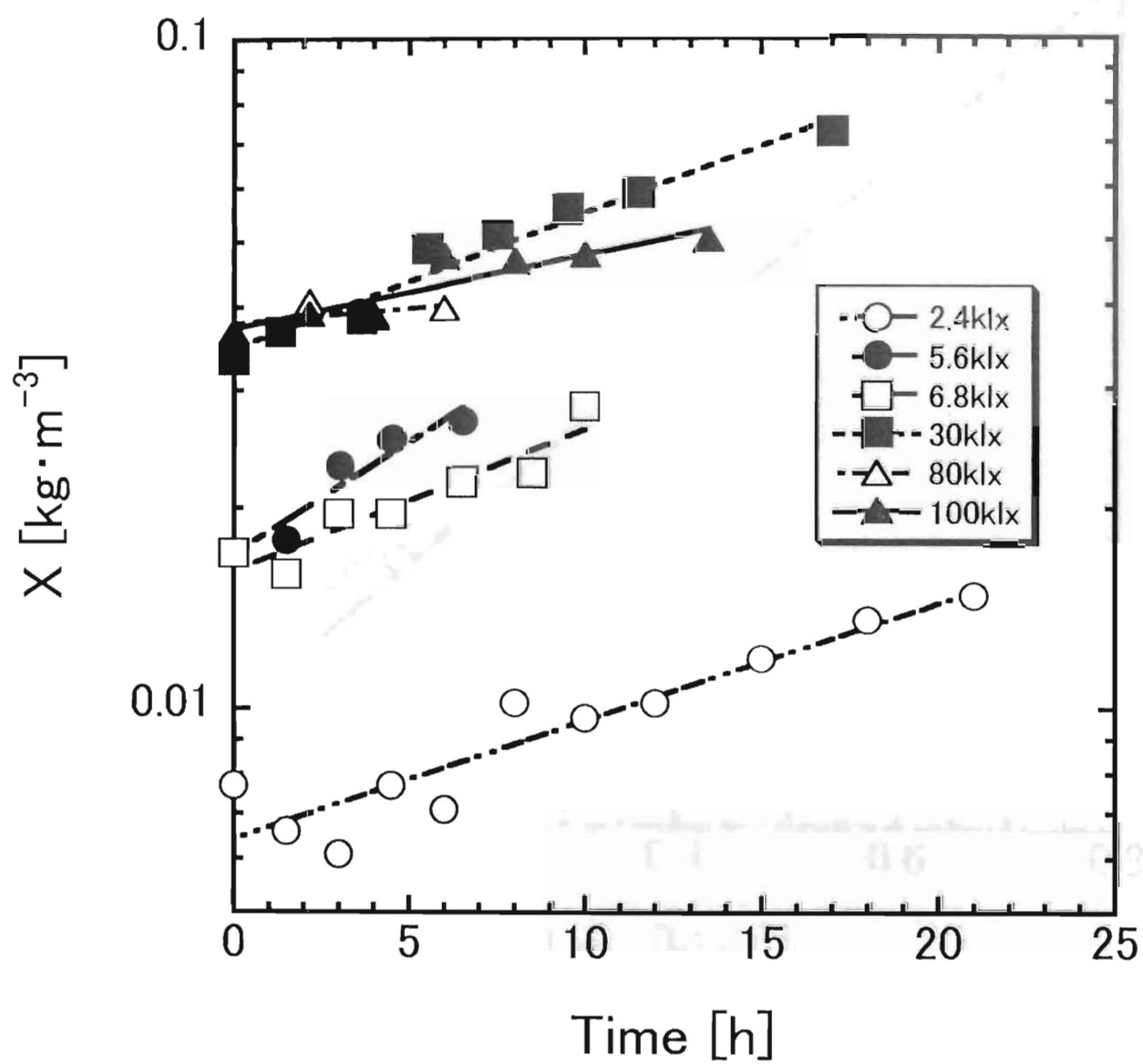


Fig.2-6 Growth curve at various light intensity

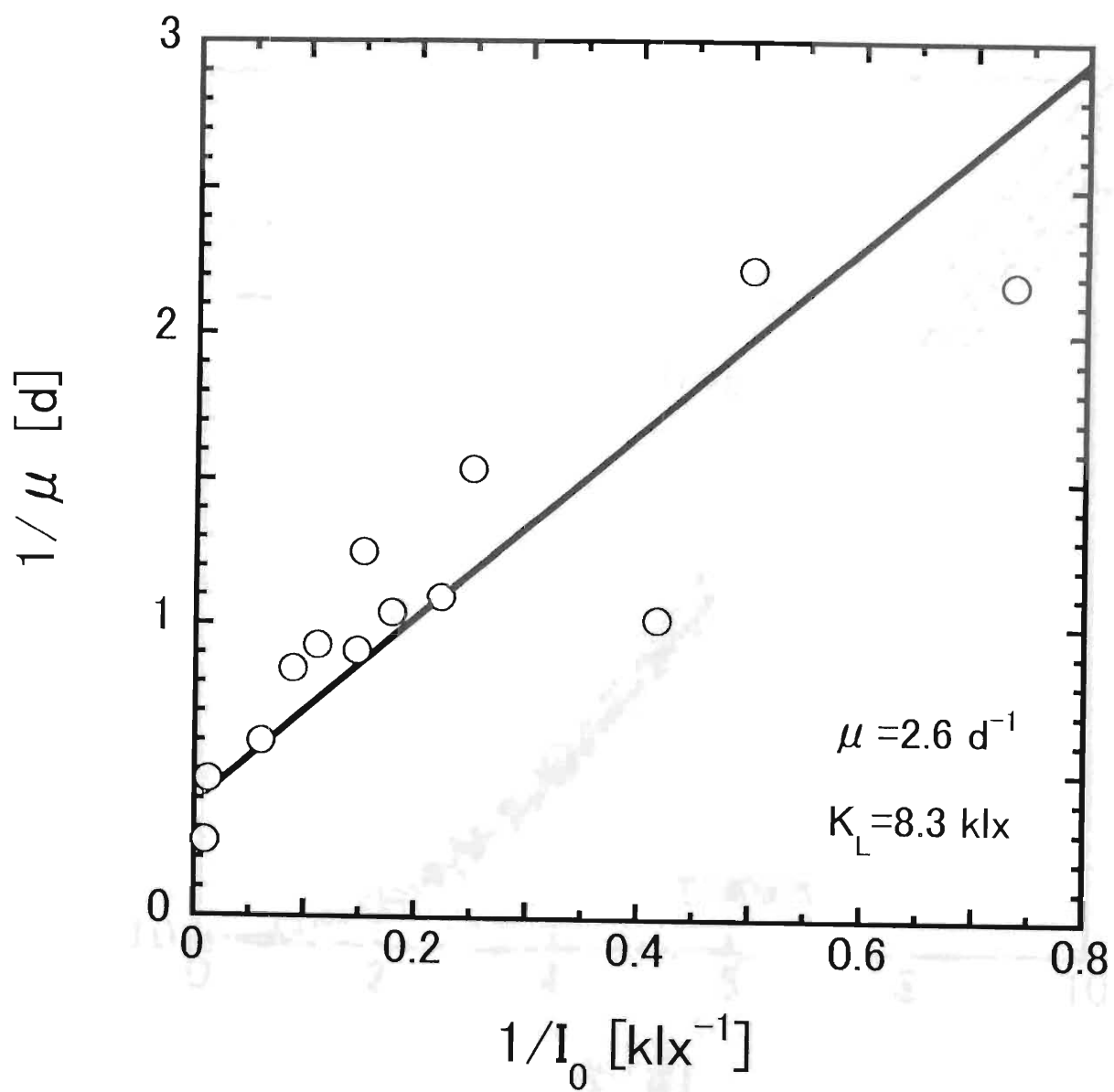


Fig.2-7 Lineweaver-Burk plot

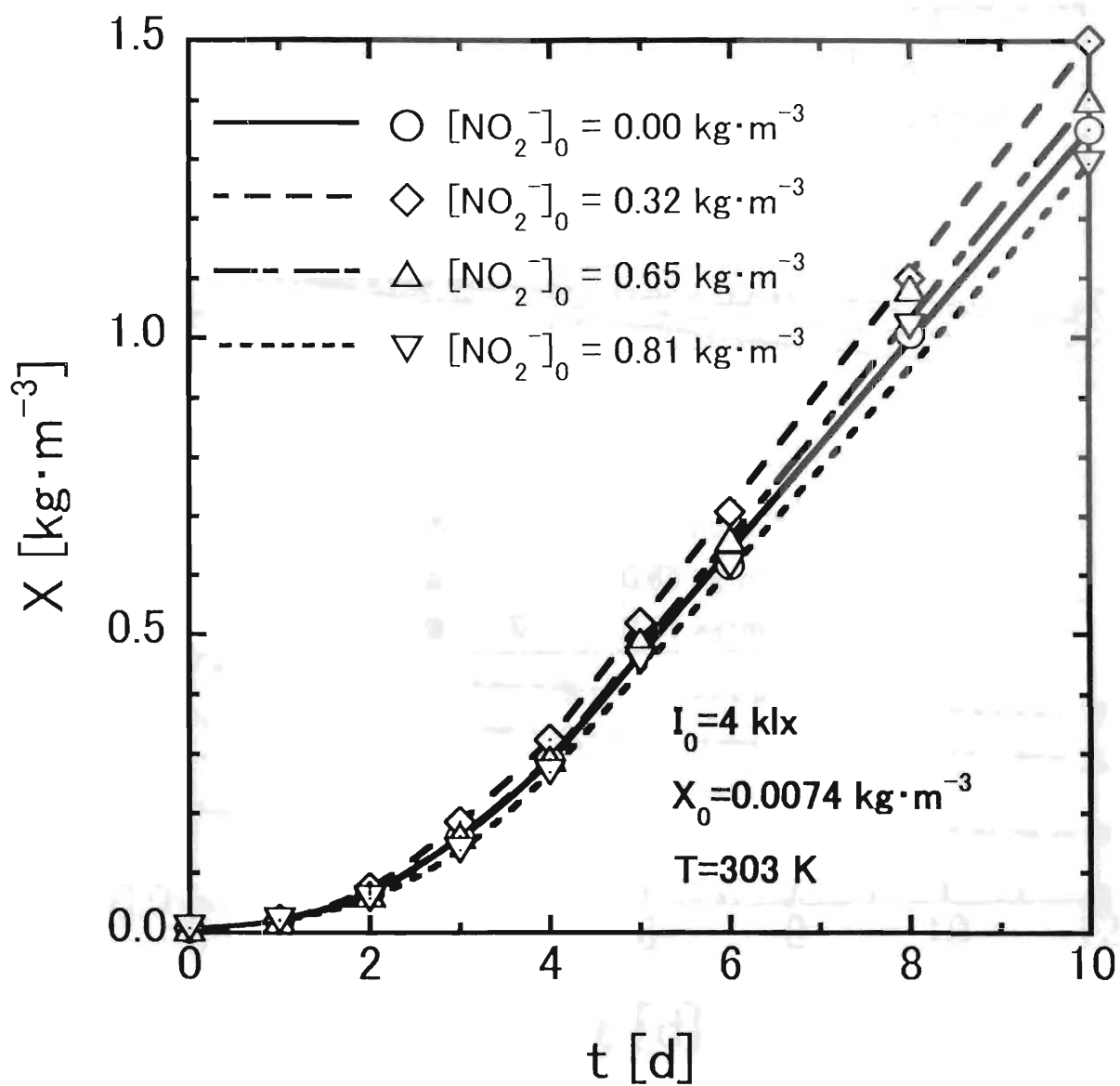


Fig.2-8 Growth curves of *S.platensis* at various nitrite concentrations

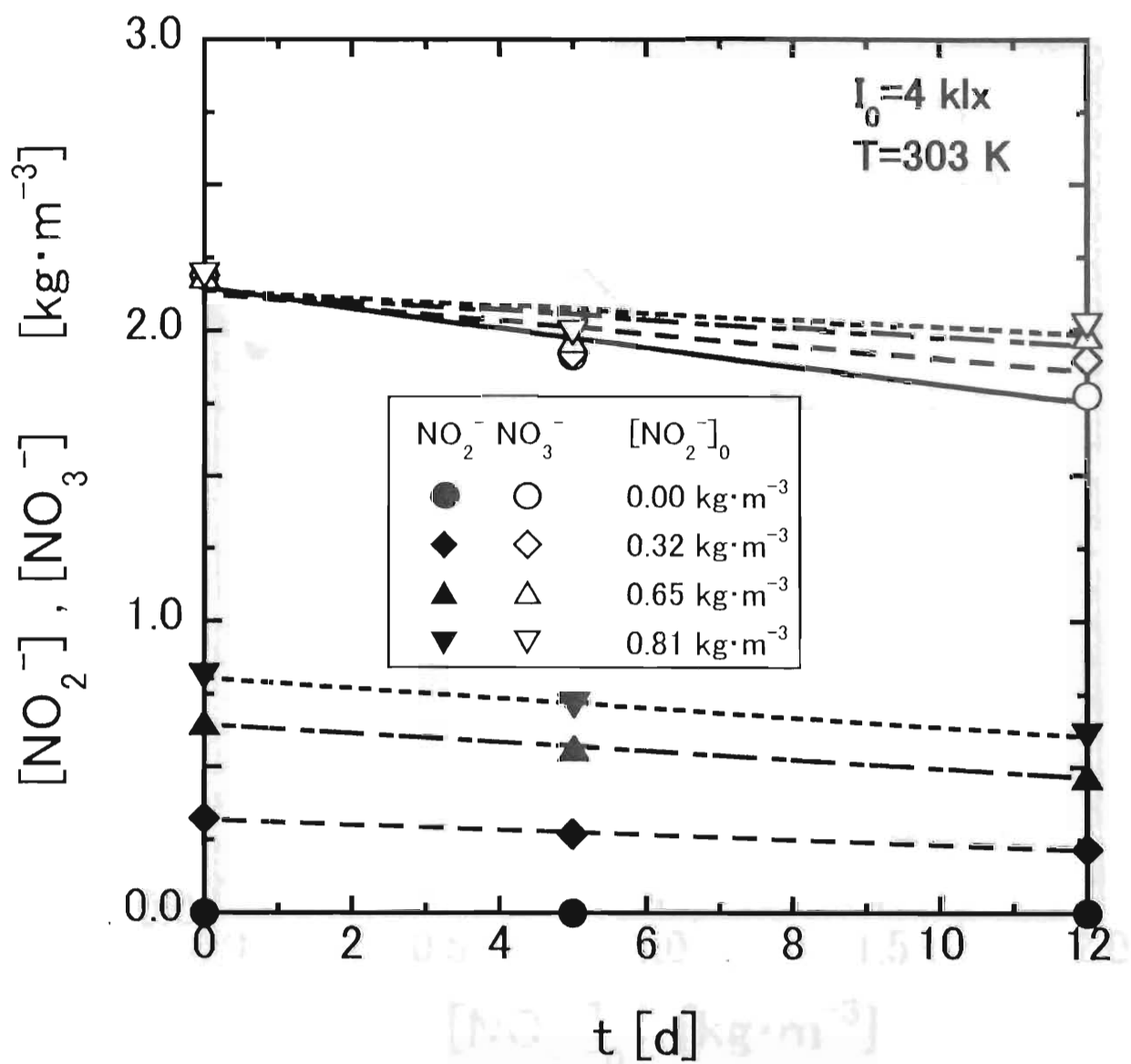


Fig.2-9 Nitrite and nitrate concentrations as a function of time

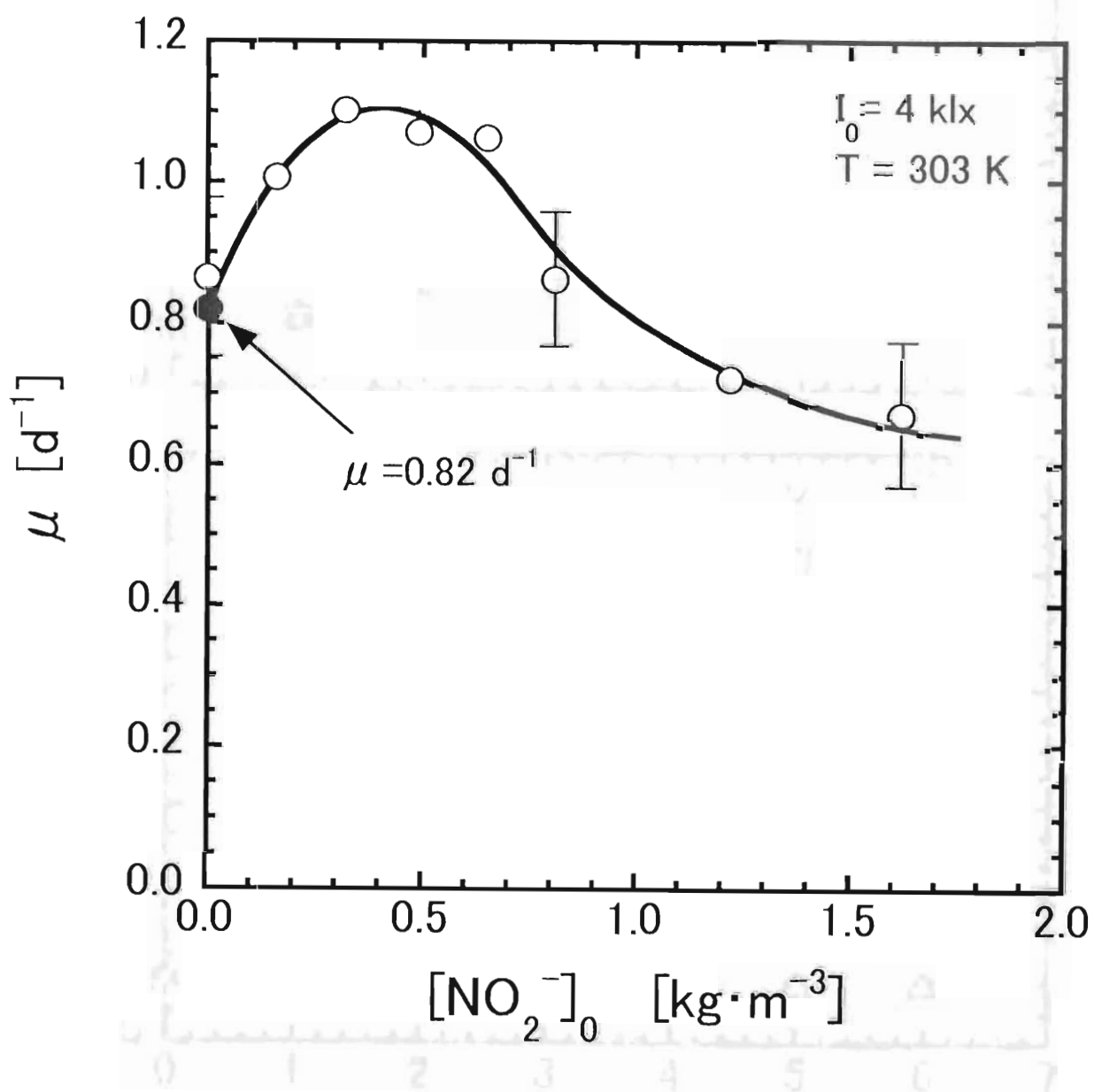


Fig.2-10 Effect of the initial nitrite concentration on the specific growth rate of *S. platensis*

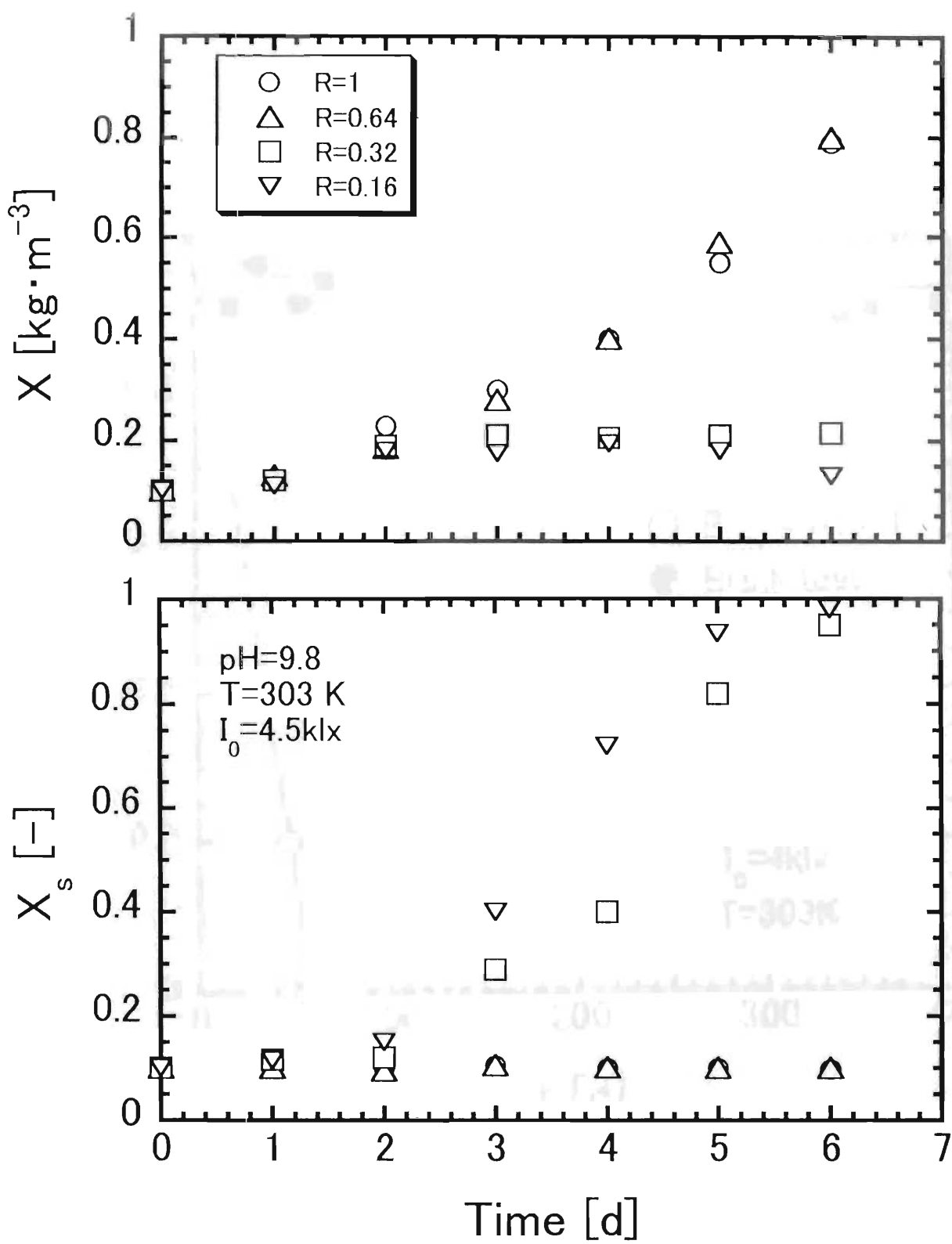


Fig.2-11 Time courses of total algal concentration X and the ratio of *Spirulina* numbers to algal numbers X_s .

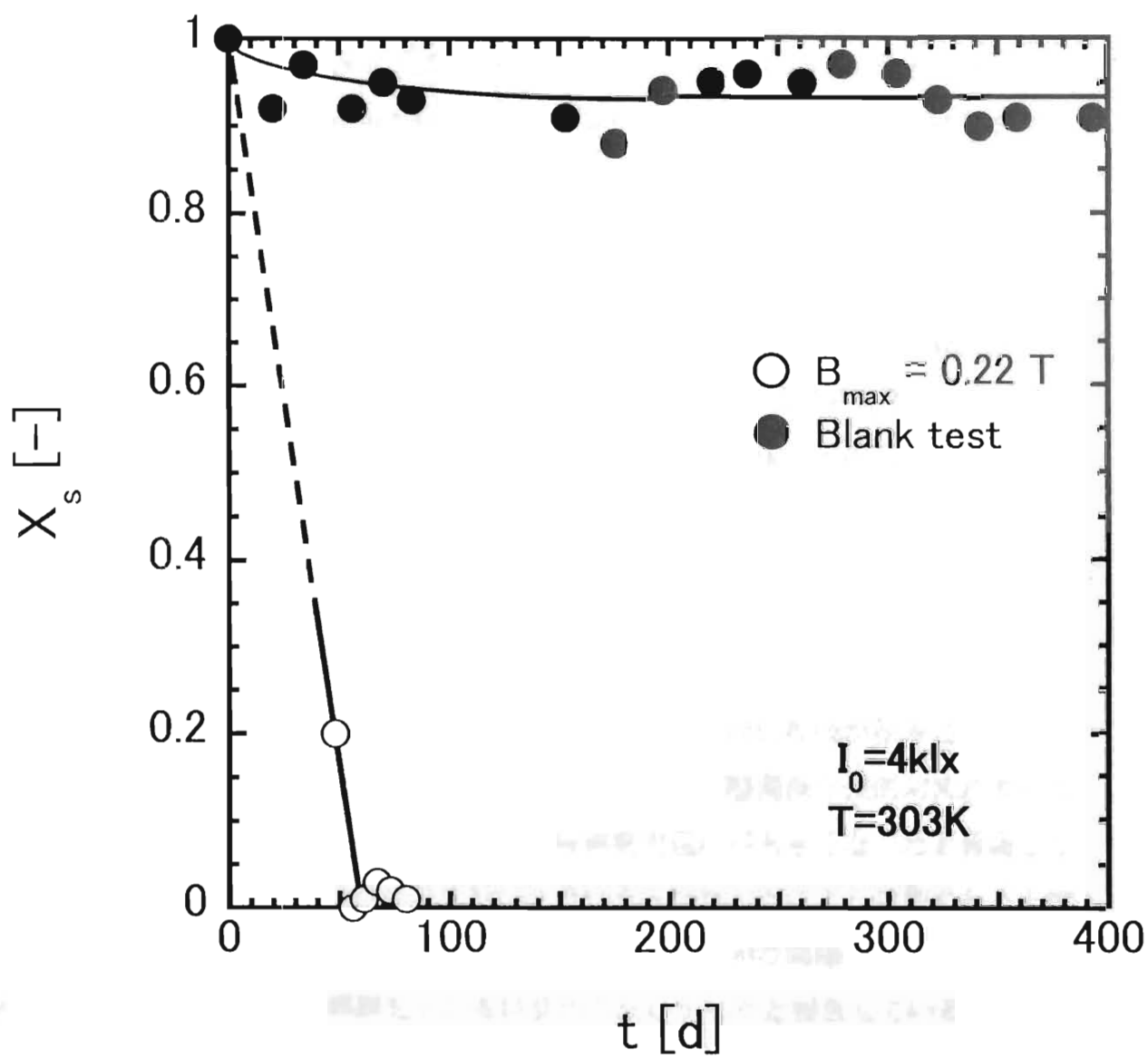


Fig.2-12 The ratios of *S.platensis* with and without magnetic field as a function of time

1 緒言

地球温暖化の原因物質の一つである二酸化炭素の除去(Akimotoら,1994)や閉鎖系環境における二酸化炭素を酸素に変換する方法として藻類の光合成能利用が検討されている(Ogawa and Aiba,1978; Oguchiら,1987,1989; Moriら,1987,1989, Shelefら,1970) 光合成速度を高めるための方策として藻体に光を周期的に照射する方法(Kok,1953; Millerら,1964)があり、連続光を照射する場合よりも周期光を照射する場合の方が効果があると報告されている(Hoshinoら,1991)。

周期光による酸素発生速度,増殖速度の測定を行った報告があるが、多くは光照射時間が1-23時間の1周期24時間の周期光を用いている(Materassiら,1984; Matsumotoら, 1997; Nakazaki and Akiyama,1993; Zevenboom and Mur,1984)。一方で、Hieke and Neeff(1989)は3種類の植物葉緑体に10msの閃光を150ms間隔で照射するとDCPIPの光還元量が最大になることを示している。Camacho-Rubio and Martinez-Sancho(1985)は *Chlorella pyrenoidosa* に光照射時間6-600ms,遮光時間1-67msの光を照射した場合について、照度,光照射時間,遮光時間を用いた増殖モデルを提案しているが、彼らのモデルは周期光を照射した場合の明反応,暗反応のみから構成され、呼吸が組み込まれていない Hoshinoら(1991)は連続光を照射しているスピルリナ懸濁液を強制対流によって混合したところ、混合効果が大きい条件ほど酸素発生速度が大きくなったと報告している。これはスピルリナの細胞が周期的な光照射を受けたことによる効果であると推論している。Ogawa and Terui(1972)はスピルリナ懸濁液に30秒間隔の明暗周期光を照射したが酸素発生に及ぼす周期光の効果は認められなかったと報告している。一方、周期光により光合成速度が変化するならば、呼吸速度も変化する可能性があるが、呼吸速度に関する報告は見受けられない。

第3章では、まずスピルリナ懸濁液に周期光を照射し、遮光時の呼吸速度を実測した。測定の結果、長時間暗条件下においた場合の比呼吸速度に比べて遮光直後の比呼吸速度は著しく大きいことを見いだした。さらに照度,光照射時間が比呼吸速度の経時変化に及ぼす影響を実験的に検討した。次にスピルリナ懸濁液に周期数 10^{-3} - 10^0 s $^{-1}$ オーダーの周期光を照射し、スピルリナの酸素発生に及ぼす周期数、1周期あたりの光照射時間及び遮光時間の影響を実験的に検討した。周期光を照射した場合の酸素発

生機構をモデル化し、定性的検討を行い、酸素発生に及ぼす周期光の効果がHoshinoらとOgawa and Teruiと異なった理由について考察した。これらの結果を基にスピルリナによる酸素供給について考察を加えた。

2 実験装置及び方法

(a-1) 呼吸速度に及ぼす照度の影響

供試藻体として照度4klxで前培養した*S.platensis*を用いた。培養液として、第2章のTable2-2で示した標準培養液を用いた。使用した実験装置図をFig.3-1に示す。光合成、呼吸により生成、消費する気体体積はO₂アップテスター(TAITEC製)を用いて測定した。スピルリナ濃度は吸光光度法、pHはpHメータ(Pasolina製,GP-1D)、大気圧は気圧計(いすゞ製作所製)で測定した。光源として市販の蛍光灯(白色光)と平行光束型高輝度光源装置(ウシオ電機製,UI-501C,ほぼ白色光)を使用した。O₂アップテスターの測定容器の体積は $13.14 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 、仕込み液体積は $3.00 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 、封入気体の体積は $10.14 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ である。測定温度は303K、測定時間は60分で一定とした。入射光照度は0-100klx、光照射時間は0-20分の範囲で変化させた。周期光を与える場合は光照射時間と遮光時間を各10分とし、光照射と遮光を3回繰り返し、計60分とした。

前述同様の前処理を施した後、実験を開始した。光照射開始時刻を0として所定時間ごとに遮光した。1分ごとに気体体積、恒温水槽温度を測定した。光照射による空気膨張を補正するため、空試験として培養液のみを測定容器に入れて同様の測定を全実験に対して行った。

(a-2) 測定容器内の気液温度測定方法

測定容器内に封入された空気及び標準培養液(Table2-2)の温度を測定するため、Fig.3-2に示すように測定容器内に熱電対の先端を入れ、Fig.3-1同様恒温槽内で測定した。まず、封入された空気の温度を測定した。平行光束型高輝度光源装置を使用すると、熱電対の先端部は、照射された直射光のため空気温度より温度が高くなる。そこで、熱電対の先端部のみを遮光するカバーを容器蓋に付けて空気温度を測定した。続いて熱電対の先端を培養液中に設置し、培養液の温度を測定した。この場合も熱電対の先端部のみを遮光するカバーを容器蓋に付けた。測定時間は各60分とし、10分光照射 / 10分遮光を3回繰り返した。入射光照度は4-100klxの範囲で変化させた。光照射開始時を時刻0として、測定容器内の空気温度または培養液温度を1分ごとに測定した。

(a-3) 溶存酸素濃度の測定方法

藻体として入射光照度4klxの連続光で3日間前培養した*S.platensis*を用いた。Fig.3-3に示すアクリル樹脂製円筒容器にスピルリナ懸濁液を入れ、光照射を行うことによって生成する酸素を溶存酸素として測定した。光路の湾曲を防ぐため、容器の外周部に角形水槽を設置した。測定容器と角形水槽の間に303Kの水を入れ、測定容器内の液温度を303Kに保った。スピルリナ懸濁液の溶存酸素濃度及び温度は溶存酸素計(TOA製、DO-11P)で測定した。スピルリナ濃度は $0.44\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、仕込み液体積は $36\times 10^{-6}\text{m}^3$ とした。シリコン栓により密封し、測定容器内に空気が入らないようにした。測定時間は各60分、光照射時間と遮光時間は同時間とした。照度は4-100klx、光照射(遮光)時間は5-15分の範囲でそれぞれ変化させた。光照射開始時を時刻0として、溶存酸素濃度を1分ごとに測定した。

(b) 酸素発生速度

藻体として入射光照度4klxの連続光で3日間前培養した*S.platensis*を、培養液として標準培養液(Table2-2)を用いた。スピルリナ濃度 X は吸光光度法で測定した。Fig.3-4に示す O_2 アップテスター(TAITEC製)、光源、回転円盤型スリット等から構成される測定装置を用い、光合成、呼吸により発生、消費する気体体積 V を測定した。光源として平行光束型高輝度光源装置(ウシオ電機製、UI-501C、ほぼ白色光)を使用した。平行光束型高輝度光源装置は水平光を照射するため45度の角度に固定した鏡を使用して光路を90度曲げ、測定容器上部から光を照射する方式とした。光照射間隔を変化させるため、Fig.3-5に示すように開口率(=切除面積/円盤面積)と開口数 m の異なる3種類の回転円盤型スリットをスピルリナ懸濁液と光源の間に挿入し、回転させた。回転円盤型スリットの回転速度、開口率、開口数を変化させることにより周期数 N 、1周期あたりの光照射時間 t_L 及び遮光時間 t_D を制御した。回転円盤型スリットの回転速度は $0.0011\text{--}0.60\text{s}^{-1}$ の範囲で変化させた。従って、単位時間当たりの周期数 N の範囲は $0.0044\text{--}2.4\text{s}^{-1}$ の範囲とした。スピルリナ濃度 X は $0.5\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、入射光照度 I_0 は60klx、仕込み培養液体積は $3\times 10^{-6}\text{m}^3$ 、測定時間は60分、測定温度は303Kで一定とした。1周期あたりの遮光時間と光照射時間の比、即ち遮光・照射時間比 t_D/t_L は1-11の範囲で変化させた。

3日間前培養したスピルリナ懸濁液は測定開始直前まで303Kの暗所で空気曝気し、溶存酸素濃度を $6\text{--}7\times 10^{-3}\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ に保った。スピルリナ濃度 $0.21\text{--}0.26\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ のスピルリナ懸濁液を測定容器に入れ、303Kとした O_2 アップテスター内で容器内の空気温と水

温との差による空気膨張が終了するまでの約60分間、恒温槽内の暗所(3lx未満)で静置した。回転円盤型スリットによって周期光を反応容器に照射し、実験開始時と終了時のキャピラリー管内の気体体積の変化から60分間で発生した気体を周期光の酸素発生量とした。空試験としてスピルリナを含まないスピルリナ培養液に対して同条件の測定を行い、光照射による空気膨張を補正した。また、連続光を反応容器に60分間照射し、キャピラリー管内の気体体積の変化を測定した。同条件で空試験を行い、連続光照射による空気膨張を補正して連続光の酸素発生量を求めた。なお、連続光の場合、予備実験として0-20,20-40,40-60分に発生した気体量を測定し、各時間ごとで発生量に差がないことを確認している。

3 実験結果及び考察

3-1 呼吸速度に及ぼす周期的光照射の影響

(1) 周期光照射中の測定容器内温度と気体体積の関係

スピルリナ懸濁液または標準培養液を入れた測定容器に入射光照度60klx、光照射時間及び遮光時間が各10分の周期光を60分間照射した場合のスピルリナ懸濁液、標準培養液試料における気体体積の変化をFig.3-6に示す。スピルリナ濃度、pHは60分間の測定中、顕著な変化は認められなかった。スピルリナ懸濁液、標準培養液試料の気体体積 V_1, V_2 はともに光照射を行うと増加し、遮光すると減少している。光照射を行った場合、測定容器内の空気温度が上昇し、遮光すると下降した。一例として、標準培養液に平行光束型高輝度光源装置で入射光照度60klx で10分間隔の周期光を与えた場合の測定容器内の気体温度 T_G 、標準培養液の温度 T_M 、恒温水槽の液温度 T_W の経時変化をFig.3-7に示す。気体温度 T_G と培養液温度 T_M は光照射を行うと約0.6K上昇し、遮光すると低下している。恒温水槽の液温度 T_W は変化しなかった。封入された気体の温度上昇による膨張量 V_T の経時変化をFig.3-8に◇で示す。大気圧を1気圧に換算すると体積 $V_{T, P}$ の経時変化は○となる。この $V_{T, P}$ の経時変化はFig.3-6の V_2 の変化とほぼ一致している。なお、培養液温度 T_M の上昇に伴う酸素、窒素の溶解度の減少から生じる気体放散量は無視できる。以上の結果より、標準培養液の気体体積 V_2 の経時変化は、主に光照射に伴う空気膨張及び収縮に起因することがわかった。照度4,8klxについては蛍光灯を光源として使用した。この場合、測定容器内の気液温度は変化しなかった。また、イオン交換水についても同様の操作を行ったところ、気体体積、気液温度とも標準培養

液の場合とほぼ同じ経時変化が得られた。これにより、光照射によって培養液中に溶解している二酸化炭素が放散しないことがわかった。使用した培養液のpHは10であることからスピルリナの呼吸によって生成した二酸化炭素は全部スピルリナ懸濁液に溶解すると推測されるため、二酸化炭素は体積変化に関与しないと仮定した。

(2) 周期光照射中の気体体積変化とスピルリナによる酸素生成・呼吸速度との関係

温度変化による気体の膨張・収縮の影響を取り除いた光合成・呼吸由来の体積 V_1 ・ V_2 の経時変化をFig.3-9に示す。約1分の遅れが見られるが、光照射、遮光に対応して体積が変化している。図中実線は1-11分のデータの最小2乗法による相関線である。相関線の勾配より1周期目の光照射時間帯 L_1 の気体発生速度を求めたところ、 $1.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ となった。気体発生速度から10分間の光照射によって発生する気体量を求めると $1.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ となる。ここで、発生した気体量とスピルリナの光合成によって生成した酸素量は等しいと仮定する。発生した酸素量は $5.9 \times 10^{-7} \text{ mol-O}_2$ 、 $1.9 \times 10^{-2} \text{ mg-O}_2$ となる。スピルリナ1kgあたりの酸素発生量を求めると $3.0 \times 10^{-1} \text{ mg-O}_2 \cdot \text{kg-Spirulina}^{-1}$ となる。

Matsumotoら(1992)はクロレラ懸濁液の溶存酸素濃度を測定し、その変化量から酸素生成・呼吸速度を算出した。そこで、本研究においても光照射時間10分、遮光時間10分、スピルリナ濃度 $0.44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ の条件で溶存酸素濃度を測定した。1周期目の光照射時間帯 L_1 で溶存酸素濃度は $7.0 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ から $12.5 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ に増加し、遮光すると溶存酸素濃度は $10.5 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ に減少した。光照射時間帯 L_1 におけるスピルリナ1kgあたりの酸素生成量は $1.3 \times 10^{-4} \text{ mg-O}_2 \cdot \text{kg-Spirulina}^{-1}$ 、遮光時間帯 D_1 における酸素消費量は $4.5 \times 10^{-3} \text{ mg-O}_2 \cdot \text{kg-Spirulina}^{-1}$ (遮光時間帯 D_1)となる。溶存酸素濃度の測定で得られたスピルリナ1kgあたりの酸素生成量 ($1.3 \times 10^{-4} \text{ mg-O}_2 \cdot \text{kg-Spirulina}^{-1}$) は、 V_1 ・ V_2 から酸素発生量 ($3.0 \times 10^{-4} \text{ mg-O}_2 \cdot \text{kg-Spirulina}^{-1}$) へ換算した値の約1/2である。酸素生成量が小さく算出された原因として、溶存酸素濃度の測定で、スピルリナ濃度が約2倍大きく、かつ、DO電極の設置により影が生じて光分布が一様でなかったこと、また、増加した溶存酸素の気化・放散などが考えられる。

1周期目の呼吸量についても同様の計算を行った。図中の遮光時間帯 D_1 に示した一点鎖線は11-21分のデータから最小2乗法によって求めた気体減少速度である。1周期目の気体減少速度は $4.5 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ であり、10分間の気体減少量を算出すると $4.5 \times 10^{-9} \text{ m}^3$ となる。呼吸により消費された酸素量は $1.8 \times 10^{-7} \text{ mol-O}_2$ 、 $5.7 \times 10^{-2} \text{ mg-O}_2$ とな

る。スピルリナ1kgあたりの酸素消費量を求めると $9.0 \times 10^3 \text{ mg-O}_2 \cdot \text{kg-Spirulina}^{-1}$ となった。

Fig.3-7中には従来呼吸速度を求めるために用いられてきた方法で測定したデータ、すなわち光照射時間0分の呼吸量も示した。同図より光照射時間0分の場合の呼吸速度は $3.8 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{O}_2 \cdot \text{min}^{-1}$ と算出され、周期光照射の遮光時間帯D₁における呼吸速度($4.5 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \cdot \text{O}_2 \cdot \text{min}^{-1}$)に比べて1桁小さい。これは、遮光直後の呼吸速度は長時間遮光した場合の呼吸速度より著しく大きく、遮光直後の呼吸速度は時間の経過とともに変化することを示唆している。これは遮光後、スピルリナ細胞内の生化学反応機構が変化するためであると考えられる。

(3) 比呼吸速度の経時変化に及ぼす照度の影響

スピルリナ懸濁液及び培養液に光照射10分、遮光50分、入射光照度4-100klxの条件で得られた気体発生量 V_1 - V_2 の経時変化をFig.3-10に示す。光照射中、 V_1 - V_2 は増加し、入射光照度25klxで発生した気体体積が最も大きくなっている。Leeら(1987), Yokotaら(1994)は藻類の比増殖速度と照度の関係を検討し、最適照度が存在することを報告している。本報の場合も定性的には類似した現象と考えられる。遮光後、 V_1 - V_2 は直線的に減少し、遮光後約15-30分(光照射開始から約25-40分)を経過すると減少傾向が変化した。遮光中のデータから次式を用いて比呼吸速度 Q を求めた。

(気体減少量の酸素質量換算値)

$$(\text{比呼吸速度}) = \frac{\text{(気体減少量の酸素質量換算値)}}{\text{(時間)}(\text{スピルリナ質量})} \quad (3-1)$$

比呼吸速度 Q の経時変化をFig.3-11に示す。遮光後約15-30分間の比呼吸速度はほぼ一定値 Q_1 (図中実線)となり、 Q_1 の値は照度の増加に伴い大きくなっている。その後、比呼吸速度 Q は急激に減少し、遮光後30分を経過すると照度に関係なく一定値 Q_2 となった。 Q_2 はFig.3-5の光照射時間0分のデータから求めた比呼吸速度 Q_0 [$=1.2 \text{ mg-O}_2 \cdot \text{kg-Spirulina}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (図中破線)]とほぼ一致した。これは、遮光後30分以上経過してからの比呼吸速度 Q_2 が、遮光後十分時間が経過してから測定していた比呼吸速度 Q_0 と同一であることを示している。

比呼吸速度 Q_1 と対数平均照度 I_{1m} の関係をFig.3-12に示す。本実験範囲では容器底面の照度 I_b と入射光照度 I_0 の比は光が最も減衰する条件で $I_b/I_0 > 0.87$ 、入射光照度と底面照度の対数平均照度 I_{1m} と入射光照度 I_0 の比は $I_{1m}/I_0 > 0.93$ である。入射光照度 I_0 の増加に伴い比呼吸速度 Q_1 は増加したが、増加率は減少している。比呼吸速度 Q_1 の照度依

存性はMonod型であると考え、次式を仮定した。

$$Q_1 - Q_0 = Q_{max} \frac{I_{1m}}{K + I_{1m}} \quad (3-2)$$

ここで、 Q_0 は入射光照度0klxの比呼吸速度、 Q_{max} は最大比呼吸速度、 K は飽和定数である。Lineweaver-BurkプロットをFig.3-13に示す。比呼吸速度 Q_0 はFig.3-9の光照射時間0分の結果から求めた。データを直線近似し最大比呼吸速度 Q_{max} 、飽和定数 K を算出したところ、光照射時間10分の場合は次のようになった。

$$Q_{max} = 13 \text{ mg-O}_2 \cdot \text{kg-Spirulina}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$K = 15 \text{ klx}$$

第2章で示したように、同スピルリナの比増殖速度をMonod型増殖速度式で表した場合、飽和定数 K_1 は8.3klxであり、比呼吸速度の飽和定数 K は若干大きい値となった。何らかの阻害により飽和定数が見かけ上大きくなったものと思われる。これらの数値をEq.(3-2)に代入して求めた計算線をFig.3-12に示した。

(4) 比呼吸速度 Q_1 に及ぼす光照射時間 t_1 の影響

照射時間を変化させた場合の比呼吸速度 Q_1 に及ぼす照射時間の影響を検討した。入射光照度を60klx、光照射時間を5-20分とした場合の気体体積 V_1 - V_2 の経時変化をFig.3-14に示す。これまでの結果同様、光照射中は気体体積が増加し、遮光中は減少している。遮光後のデータから比呼吸速度 Q_1 を求めた。入射光照度60klxについてFig.3-14より求めた比呼吸速度 Q_1 と光照射時間 t_1 の関係をFig.3-15に示す。また、同図中にはFig.3-9中の周期光照射のうちL₁-D₁時間帯の比呼吸速度を●で、光照射時間0分の比呼吸速度 Q_0 を■で示した。遮光直後の比呼吸速度 Q_1 は従来法で求めた比呼吸速度 Q_0 よりも1桁大きい。光照射時間 t_1 を5-20分とした本実験範囲内では光照射時間 t_1 の影響は顕著には現れていない。

3.2 酸素発生速度に及ぼす周期的光照射の影響

酸素発生に及ぼす周期光の影響を検討するため、周期光と連続光の酸素発生量を同一の光照射時間で比較した。その指標として次式で表される酸素発生量比 r を用いた。

$$r = \frac{\text{(周期光の酸素発生量)}}{\text{(円盤開口率)(連続光の酸素発生量)}} \quad (3-3)$$

Fig.3-16に単位時間当たりの周期数 N と酸素発生量比 r の関係を示す。周期数 N の増加に伴い酸素発生量比 r は大きくなった。酸素発生量比 r が1以上となる周期数 N は遮光・

照射時間比 t_0/t_L 、即ち、使用した開口率 a によって異なる。

周期光1周期あたりの光照射時間 t_L を周期数 N と遮光・照射時間比 t_0/t_L から算出した。Fig.3-17に1周期あたりの光照射時間 t_L と酸素発生量比 r の関係を示す。図より、 r が1以上となる t_L は t_0/t_L に関係なく約1秒以下である。 t_L が小さい条件では t_0/t_L が大きい回転円盤型スリットを使用すると r が大きくなる傾向が認められる。一方、 t_L が約1秒以上の条件では r が1未満となった。このことから、スピルリナの周期光照射において酸素発生量が増加する範囲を決定する因子は1周期あたりの光照射時間 t_L であり、その範囲内で酸素発生量比 r を大きくする因子は1周期あたりの遮光時間 t_0 であると推論される。

次に本実験で得られた周期光照射中のスピルリナの酸素発生速度、呼吸速度の関係を以下の仮定を基にして定性的に考察する。

- ①光照射中に発生する正味の酸素発生速度を k_L とし、遮光中の呼吸速度を Q とする。
- ②酸素発生速度は光照射直後に最大値 $k_{L, \max}$ となり、時間の経過と共に一定値 $k_{L, \infty}$ に近づく。
- ③最大酸素発生速度 $k_{L, \max}$ は1周期あたりの遮光時間 t_0 が小さい範囲では、1周期あたりの遮光時間 t_0 の増加と共に増加し、 t_0 が大きい範囲では一定となる。
- ④十分時間経過した後の $k_{L, \infty}$ は連続光の酸素発生速度に等しい。
- ⑤遮光中は全く酸素を発生しない。
- ⑥遮光中の呼吸速度 Q は一定値である。

上記仮定①は光照射中に見かけの酸素発生量を考え、遮光中は呼吸のみ行われることを考えることにより導かれる。仮定②,③は光合成を構成する明反応,暗反応(Imahori and Yamakawa,1990)における補酵素NADPの反応を考慮することにより導かれる。ここで、 $k_{L, \max}$ は細胞内のNADP量とNADPH量によって決まる酸素発生速度で、NADPが細胞内に多く存在する場合 $k_{L, \max}$ の値は大きくなる。 $k_{L, \infty}$ は暗反応が律速となっている場合の酸素発生速度に相当する。仮定④は前述した予備実験の結果で示したように、光照射開始時が異なる20分間で発生した連続光の酸素発生量は一定であることから導かれる。仮定⑤は明反応における酸素発生機構から導かれる。仮定⑥は遮光直後の呼吸速度の実測結果、すなわち遮光後15分間の Q は一定値であることから導かれる。

上記仮定に基づき、酸素発生速度と呼吸速度の経時変化を示すとFig.3-18のようになる。光照射中の平均酸素発生速度 K_L は次式で求めることができる。

$$K_L = \frac{\int_0^{t_L} k_L dt}{\int_0^{t_L} dt} \quad (3-4)$$

ここで、平均酸素発生速度 K_L と酸素発生速度 $k_{L, \infty}$ の間には次の関係を仮定する。

$$K_L t_L - k_{L, \infty} t_L = (k_{L, \max} - k_{L, \infty}) \Delta t \quad (3-5)$$

右辺は図中の破線で表されるように光照射直後の酸素発生速度が大きい時間を矩形で近似したものであり、 Δt はその見かけの時間である。Eq.(3-5)を整理し直すと、

$$K_L = k_{L, \infty} + (k_{L, \max} - k_{L, \infty}) \frac{\Delta t}{t_L} \quad (3-6)$$

で表される。ここで、 Δt のオーダーよりも t_L が十分大きいオーダーの場合、 $\Delta t/t_L$ は無視小となり、 K_L は $k_{L, \infty}$ と等しくなる。 Δt と同じ、又は小さいオーダーの光照射時間を持つ周期光を照射した場合、右辺第2項が大きくなるため、 K_L は $k_{L, \infty}$ 、即ち連続光照射時の酸素発生速度よりも大きくなる。従ってこの場合には周期光の光照射中に発生する酸素量 $K_L t_L$ は、同一時間連続光を照射した場合に発生する酸素量 $k_{L, \infty} t_L$ よりも大きくなる。

藻体量を XV_s とすると、遮光中にスピルリナの呼吸により消費される酸素量は $Q_{LD} XV_s$ 、光照射中の酸素発生量は $K_L t_L XV_s$ であるので、周期光照射で1周期あたりの酸素発生量 V_p は次式で表される。

$$V_p = (K_L t_L - Q_{LD}) XV_s \quad (3-7)$$

20分間で発生した連続光の酸素発生量は光照射開始からの時間が異なっても差違が認められないことから、対応する酸素発生速度は $k_{L, \infty}$ とみなせる。連続光照射を行った場合、周期光1周期あたりの光照射時間 t_L と同じ時間で発生する酸素量 V_c は次式で表される。

$$V_c = (k_{L, \infty} t_L) XV_s \quad (3-8)$$

よって、酸素発生量比 r はEqs.(3-7),(3-8)から次式で表される。

$$r = \frac{V_p}{V_c} = \frac{K_L t_L - Q_{LD}}{k_{L, \infty} t_L} \quad (3-9)$$

K_L にEq.(3-6)を代入すると、次式が得られる。

$$r = 1 + \frac{k_{L, \max} - k_{L, \infty}}{k_{L, \infty}} \frac{\Delta t}{t_L} - \frac{Q}{k_{L, \infty}} \frac{t_D}{t_L} \quad (3-10)$$

ここで、Eq.(3-10)の右辺第2項が周期光による酸素発生の促進効果を表す項に対応し、右辺第3項は呼吸による酸素消費を表す項に対応する。Eq.(3-10)の右辺第2項の促進効果がほとんど無視できる条件、即ち、 t_L を大きくすると r は1未満になる。Eq.(3-10)の右辺第2項を無視し、 $t_D/t_L=1$ の円盤の場合について連続光の酸素発生速度と遮光後30分以上経過した後の呼吸速度 Q_0 と遮光直後の呼吸速度 Q_1 を用いる。右辺第2項を無視したEq.(3-10)より r を試算すると、酸素発生量比 r はそれぞれ0.97(Q_0)、0.06(Q_1)となった。Fig.3-17の $t_D/t_L=1$ 、 $t_L=10^{-1}$ - 10^{-2} sの r の値は約0.05であり、本実験結果は Q_1 から試算した値とほぼ等しい。その他の回転円盤型スリットを用いた場合、 t_L が大きい範囲では試算した r の値は負となった。

また、周期光の1周期あたりの光照射時間 t_L を小さくすることによりEq.(3-10)の右辺第2項が大きくなり、右辺第3項は右辺第2項に比べて小さくなり、無視できるようになる。従って、周期数 N が大きくなれば t_L が小さくなることを考慮すると、Fig.3-16に示したようにいずれの t_D/t_L の場合でも、 N の増加に伴い酸素発生量比 r が大きくなることを定性的に説明できる。いずれの t_D/t_L を用いた場合においても、 t_L が小さい条件では、前述同様Eq.(3-10)の右辺第3項が無視できる。この場合、右辺第2項の $k_{L, \max}$ は t_D の増加とともに大きくなるため、 t_L が一定の条件で t_D/t_L の大きい円盤を使用した場合、 r の値は大きくなる。実験結果でもFig.3-17で示したように t_L が 10^{-1} sオーダーで、 t_L 一定の場合の r の値は t_D/t_L が増加するにつれて大きくなっている。以上のことより、本研究で提案したモデルにより定性的にはスピルリナの酸素発生速度と周期光照射の関係を表すことができる。

Hoshinoら(1991)はスピルリナ懸濁液に連続光を照射した場合、強制対流による混合効果が大きい条件ほど酸素発生速度が大きくなったと報告している。混合効果が大きい条件ほど特定のスピルリナに対する光照射時間、光照射周期が小さくなり、全体としての酸素発生速度が増大したものと推定される。一方、Ogawa and Terui(1972)はスピルリナ懸濁液に周期照射による促進効果が認められなかったと報告している。Fig.3-19にOgawa and Teruiの測定した酸素濃度の経時変化を示す。光照射時の傾きから連続光による見かけの酸素発生速度 k_s (直線①、 $1.4 \times 10^{-7} \text{ M} \cdot \text{s}^{-1}$)を、遮光時の傾きから呼

吸速度 Q (直線②, $1.1 \times 10^{-8} \text{ M} \cdot \text{s}^{-1}$)を、時刻0, 1, 2分の点を結んだ直線の傾きから周期光による見かけの酸素発生速度 k_p (直線③, $6.4 \times 10^{-8} \text{ M} \cdot \text{s}^{-1}$)を求めることができる。この条件は円盤開口率0.50に相当する。Eq.(3-3)より酸素発生量比 r を算出すると0.93となり、周期照射による促進効果は確かに認められない。Fig.3-17中にOgawa and Teruiの結果から算出した r の値と光照射時間 t_L の関係を示した。1周期あたりの光照射時間 t_L が30秒の条件は本実験範囲では促進効果が得られない範囲内であり、定性的な傾向は一致している。

以上の結果より、本報とHoshinoら、Ogawa and Teruiの周期光照射効果の差異は光照射周期及び光照射時間の差異によって生じたものと考えられる。

4 結論

光照射後、光を遮断してスピルリナの比呼吸速度 Q の経時変化に及ぼす入射光照度 I_0 及び光照射時間 t_L の影響を実験的に検討した。次に、回転円盤型スリットを用いてスピルリナ懸濁液に周期光を照射し、スピルリナの酸素発生量に及ぼす周期数 N 、1周期あたりの光照射時間 t_L 及び遮光時間 t_0 の影響をEq.(3)で定義した酸素発生速度比 r を指標として実験的に検討した。

その結果、以下の知見を得た。

- (1) 比呼吸速度 Q は遮光直後より約15-30分間一定値 Q_1 を保ち、その後急激に減少し、遮光後30分以上経過すると再び一定値 Q_2 となる。
- (2) 遮光直後の比呼吸速度 Q_1 は入射光照度 I_0 の増加に伴い増加し、 Q_1 の照度依存性はEq.(3-2)で表すことができた。
- (3) 本実験範囲($t_L=5-20$ 分)においては、遮光直後の比呼吸速度 Q_1 に及ぼす t_L の影響は顕著ではなく、 Q_1 はほぼ一定値となった。
- (4) 遮光後30分以上経過した場合の比呼吸速度 Q_2 は遮光前の入射光照度 I_0 によらず一定で、長時間暗条件下での比呼吸速度 $Q_0=1.2 \text{ mg} \cdot 0.2 \cdot \text{kg-Spirulina}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ とほぼ一致した。
- (5) 本実験範囲の周期光を照射すると単位時間当たりの周期数 N の増加に伴い、酸素発生量比 r は増加する。
- (6) 酸素発生量比 r が1以上となる周期数 N は遮光・照射時間比 t_0/t_L によって異なるが、 r の値が1以上となる1周期あたりの光照射時間 t_L は t_0/t_L の値に関係なく約1秒以下である。 t_L が1秒より小さい条件では t_0 が大きくなると r の値が大きくなった。

(7) 酸素発生量比 μ に及ぼす周期光の影響に関する実験結果はFig.3-18に示した周期光照射中のスピルリナの酸素発生速度と呼吸速度の経時変化の簡明なモデルにより定性的に説明できる。



Fig. 3. 18. A schematic diagram of the experimental setup for measuring oxygen production and respiration in Spirulina.

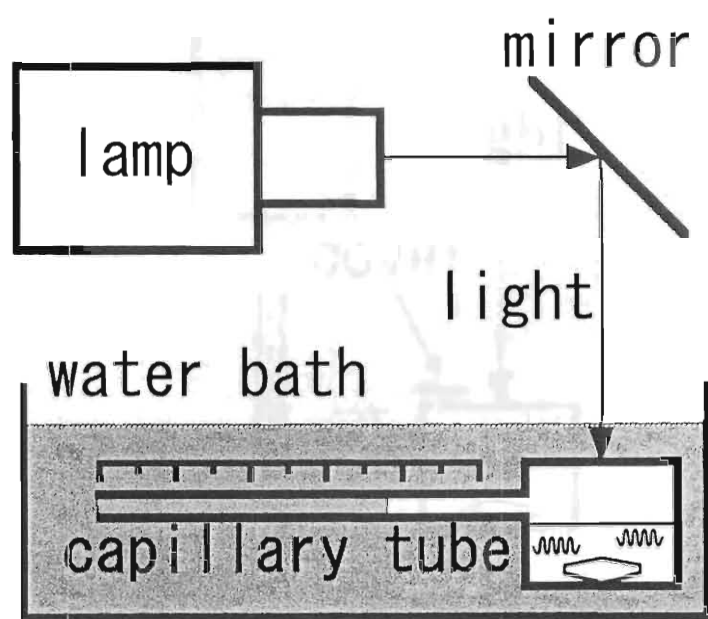


Fig.3-1 Experimental apparatus for measuring O_2 production and respiration rate

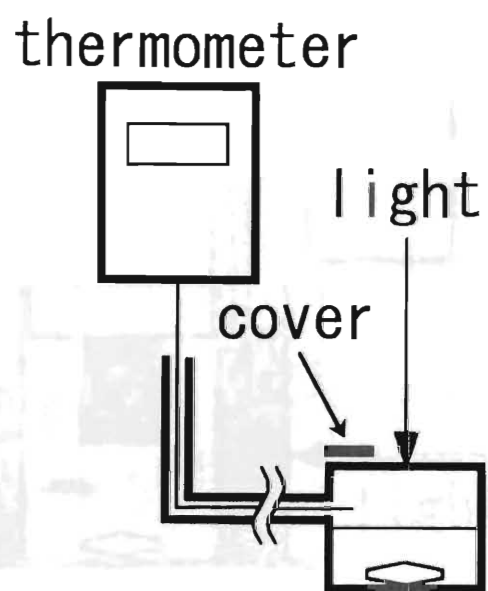


Fig.3-2 Experimental apparatus for measuring temperature (gas and medium)

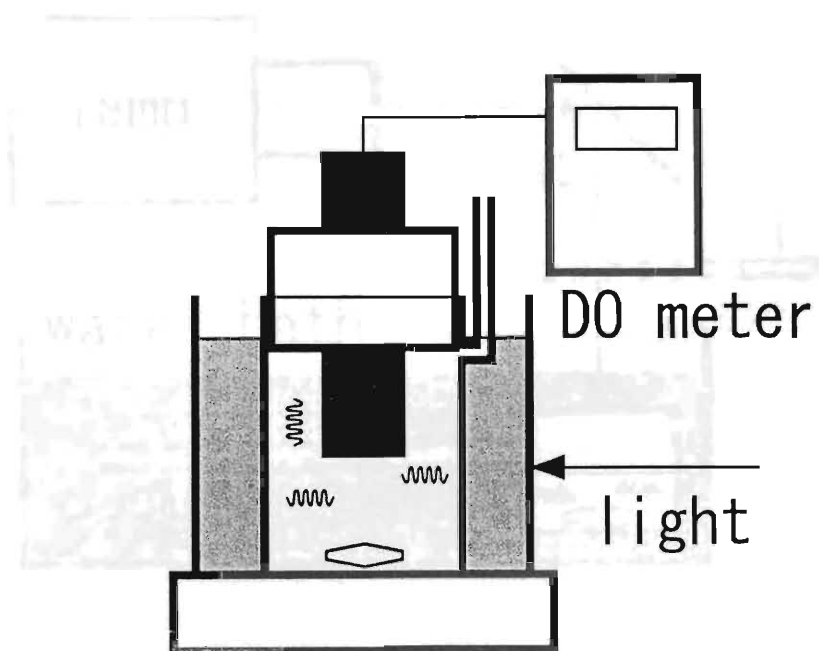


Fig.3-3 Experimental apparatus for measuring dissolved oxygen

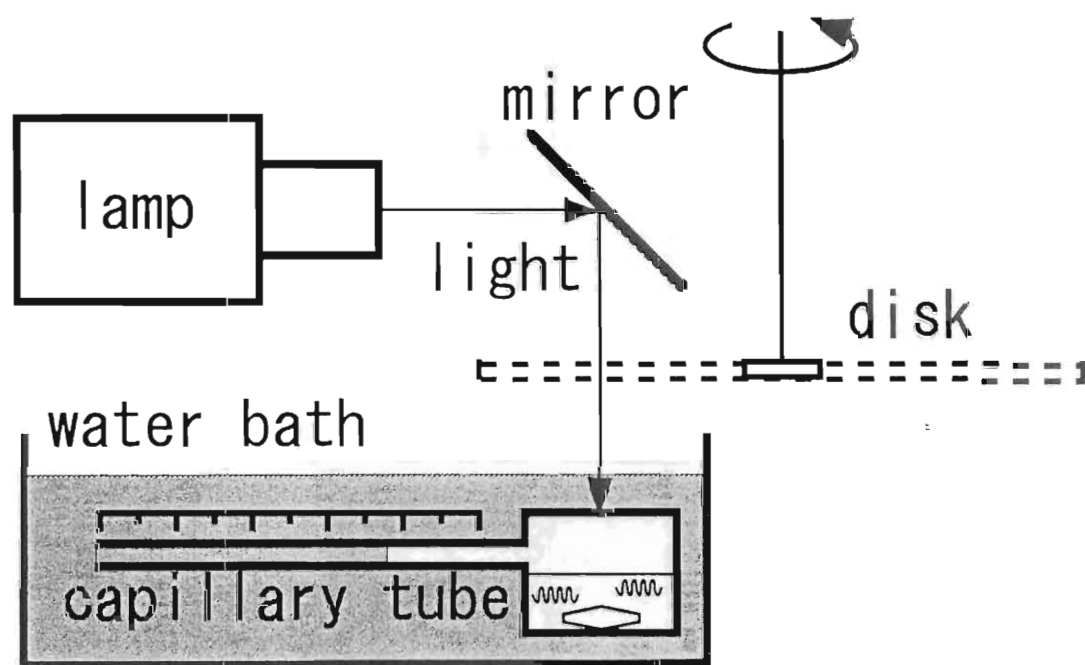
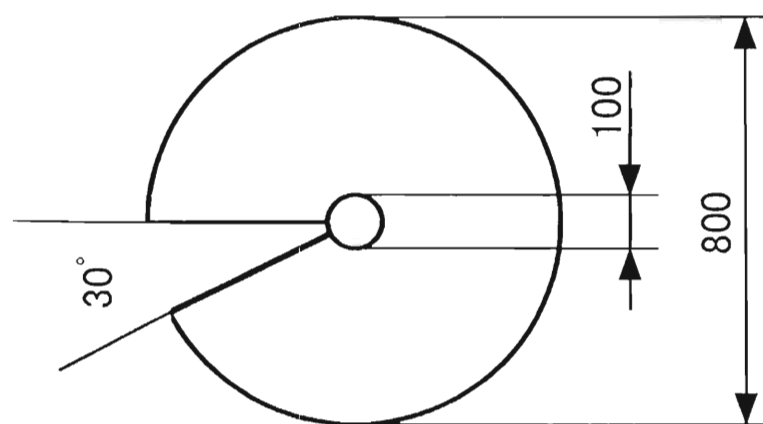


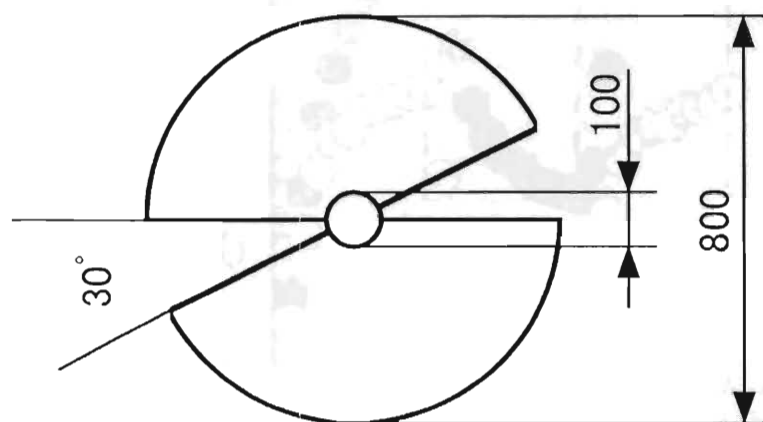
Fig.3-4 Schematic diagram of the experimental setup



(a) $\alpha = 0.083$

$$t_D/t_L = 11$$

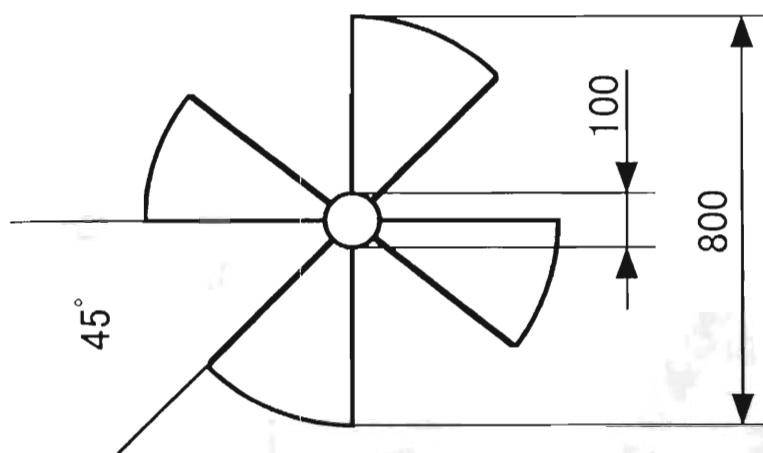
$$m = 1$$



(b) $\alpha = 0.167$

$$t_D/t_L = 5$$

$$m = 2$$



(c) $\alpha = 0.500$

$$t_D/t_L = 1$$

$$m = 4$$

Fig.3-5 Slit of the rotating disk

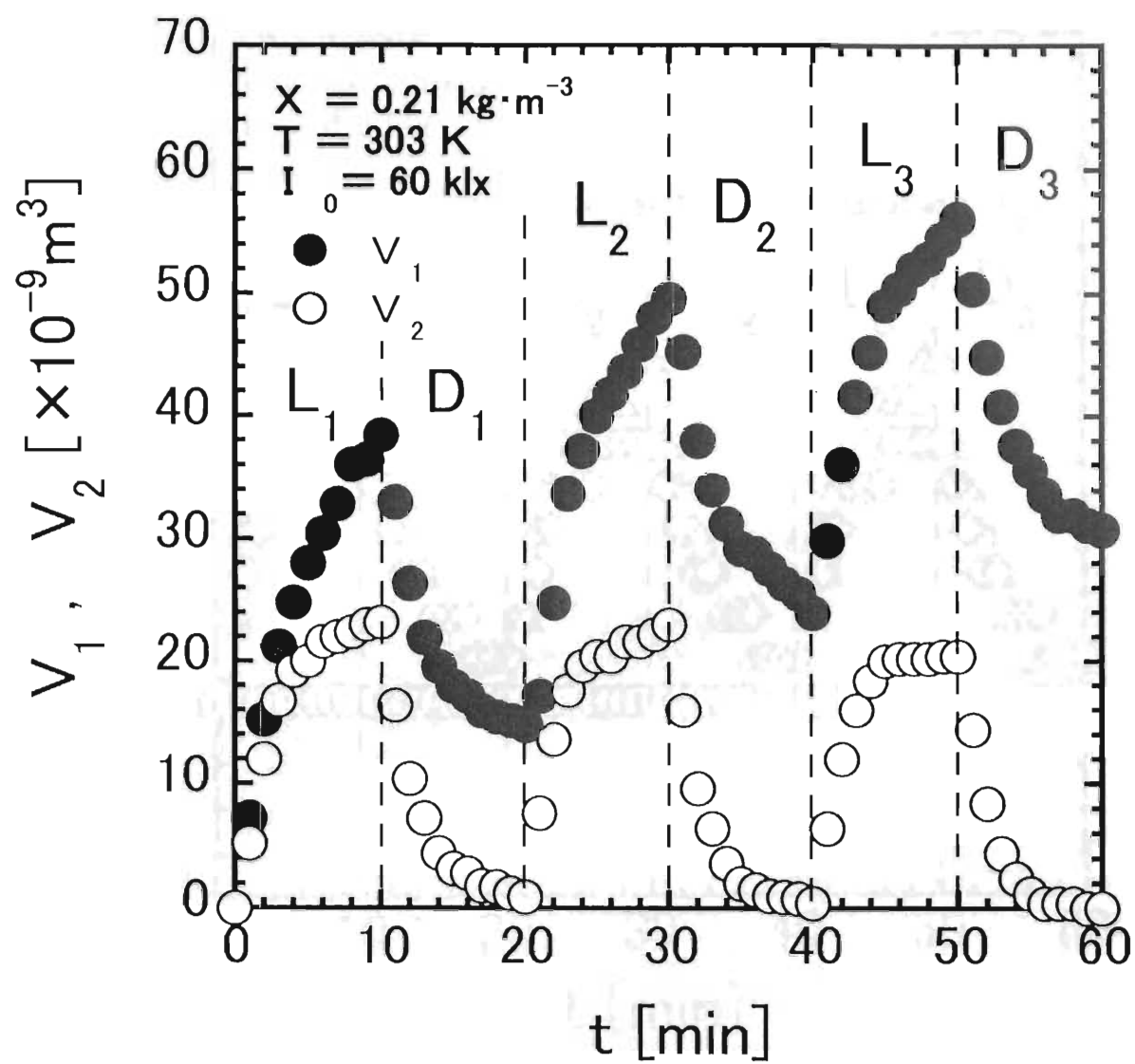


Fig.3-6 Time courses of gas volume V_1 (*S. platensis* suspension), V_2 (medium only)

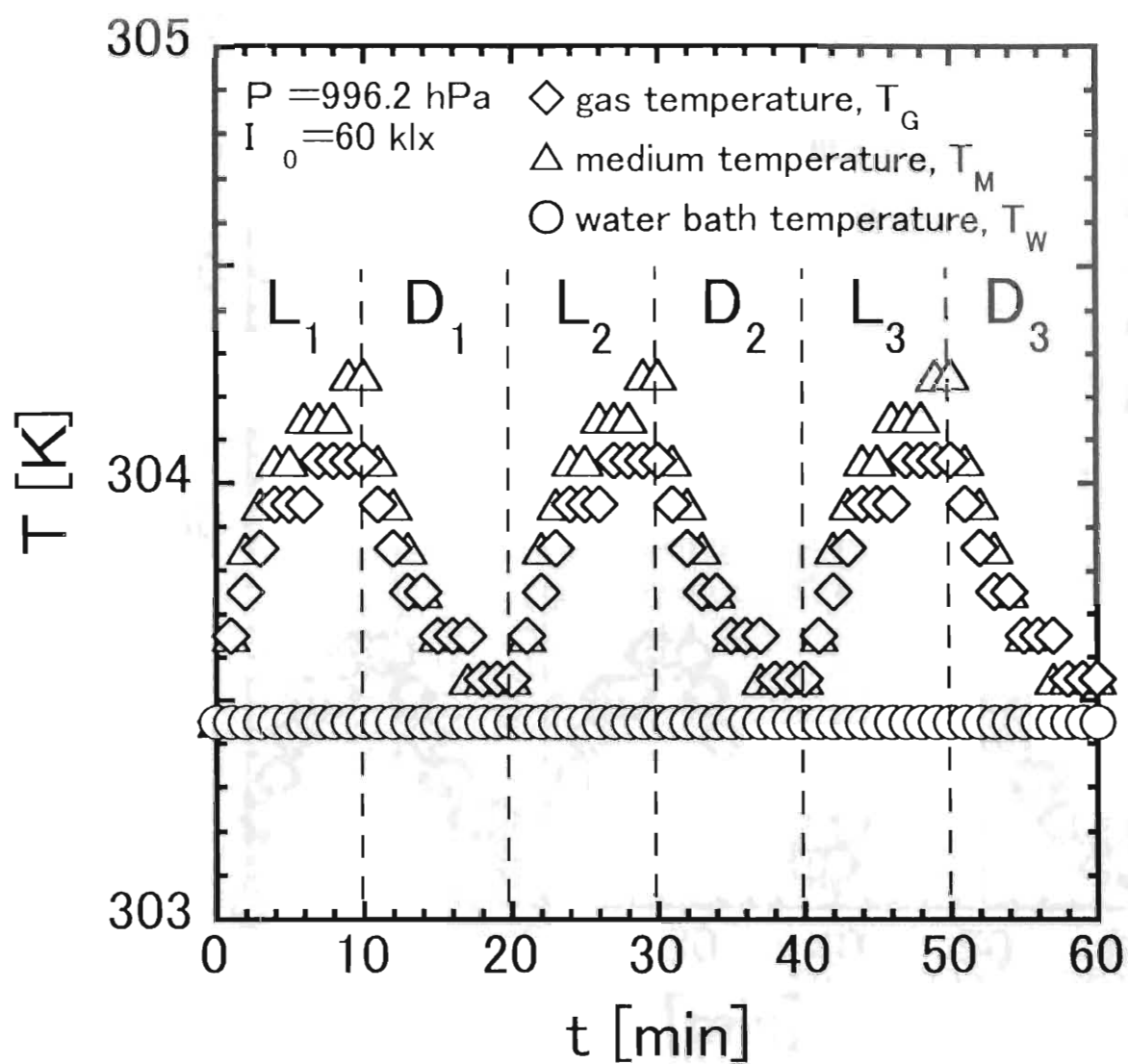


Fig.3-7 Time courses of gas temperature T_G , medium temperature T_M , water bath temperature T_W

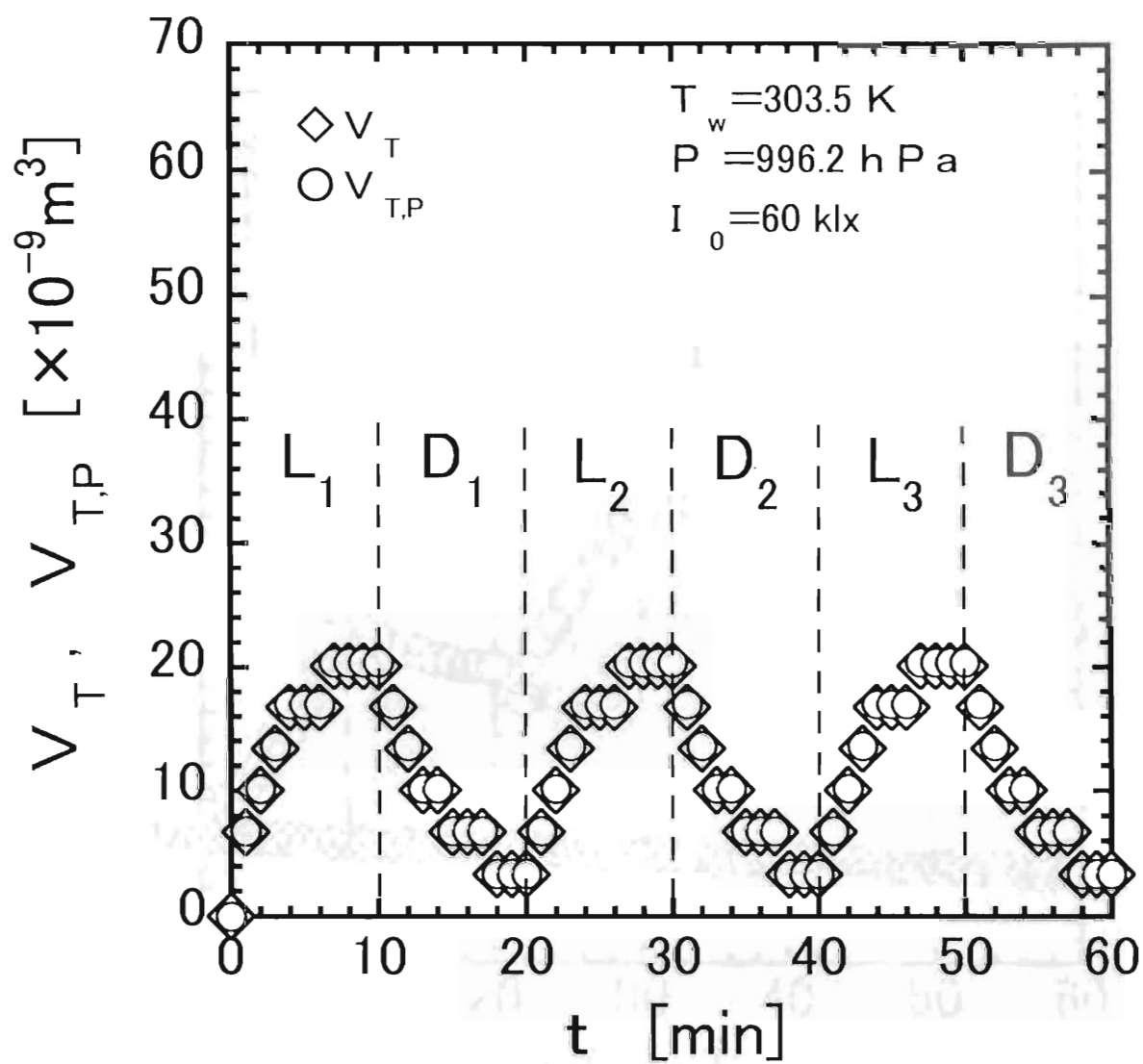


Fig.3-8 Time courses of gas volume $V_T, V_{T,P}$

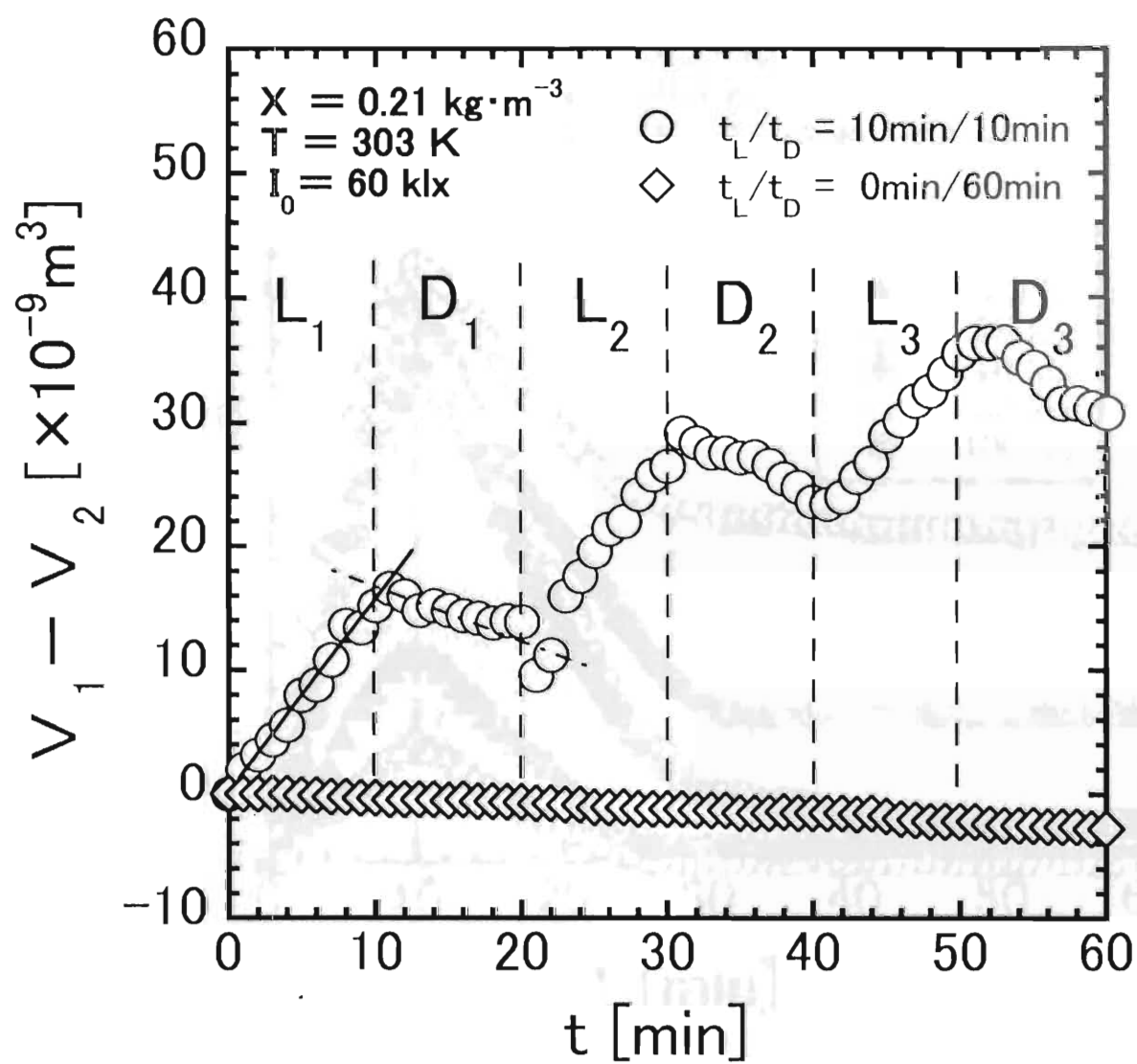


Fig.3-9 Time courses of $V_1 - V_2$ ($t_L/t_D=10\text{min}/10\text{min}$ and $t_L/t_D=0\text{min}/60\text{min}$)

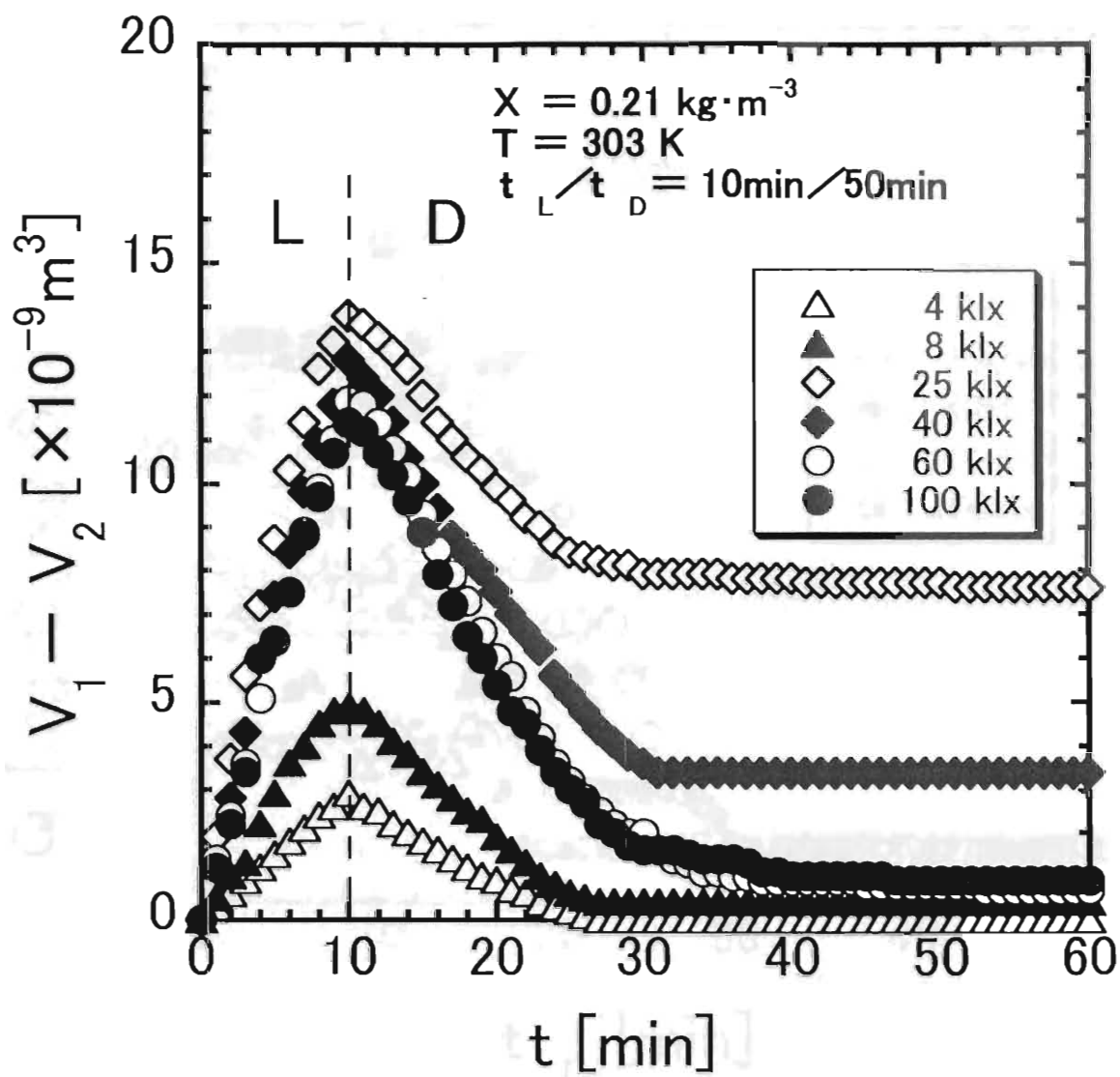


Fig.3-10 Time course of $V_1 - V_2$ ($t_L/t_D=10\text{min}/50\text{min}$)

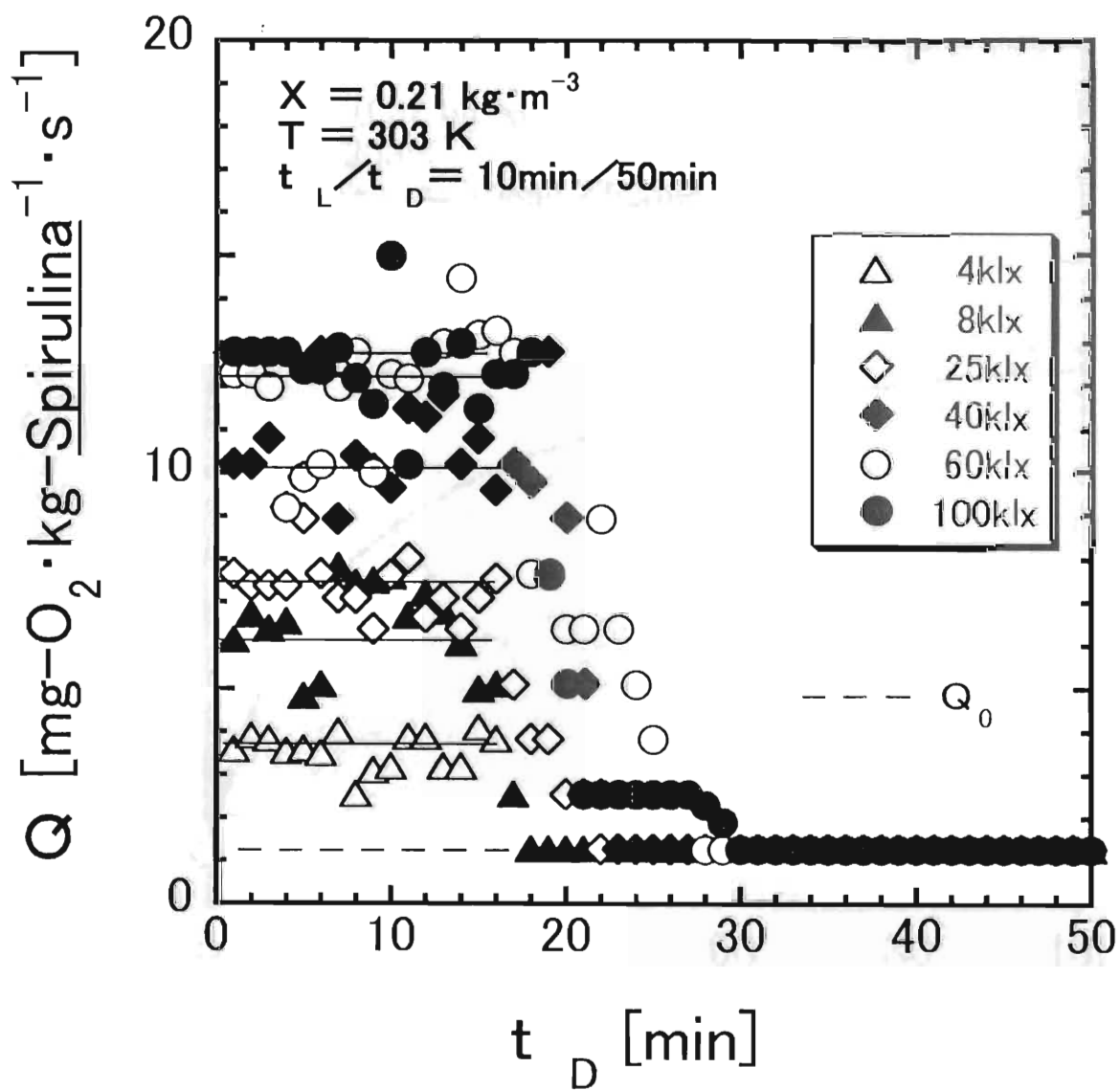


Fig.3-11 Time courses of specific respiration rate Q

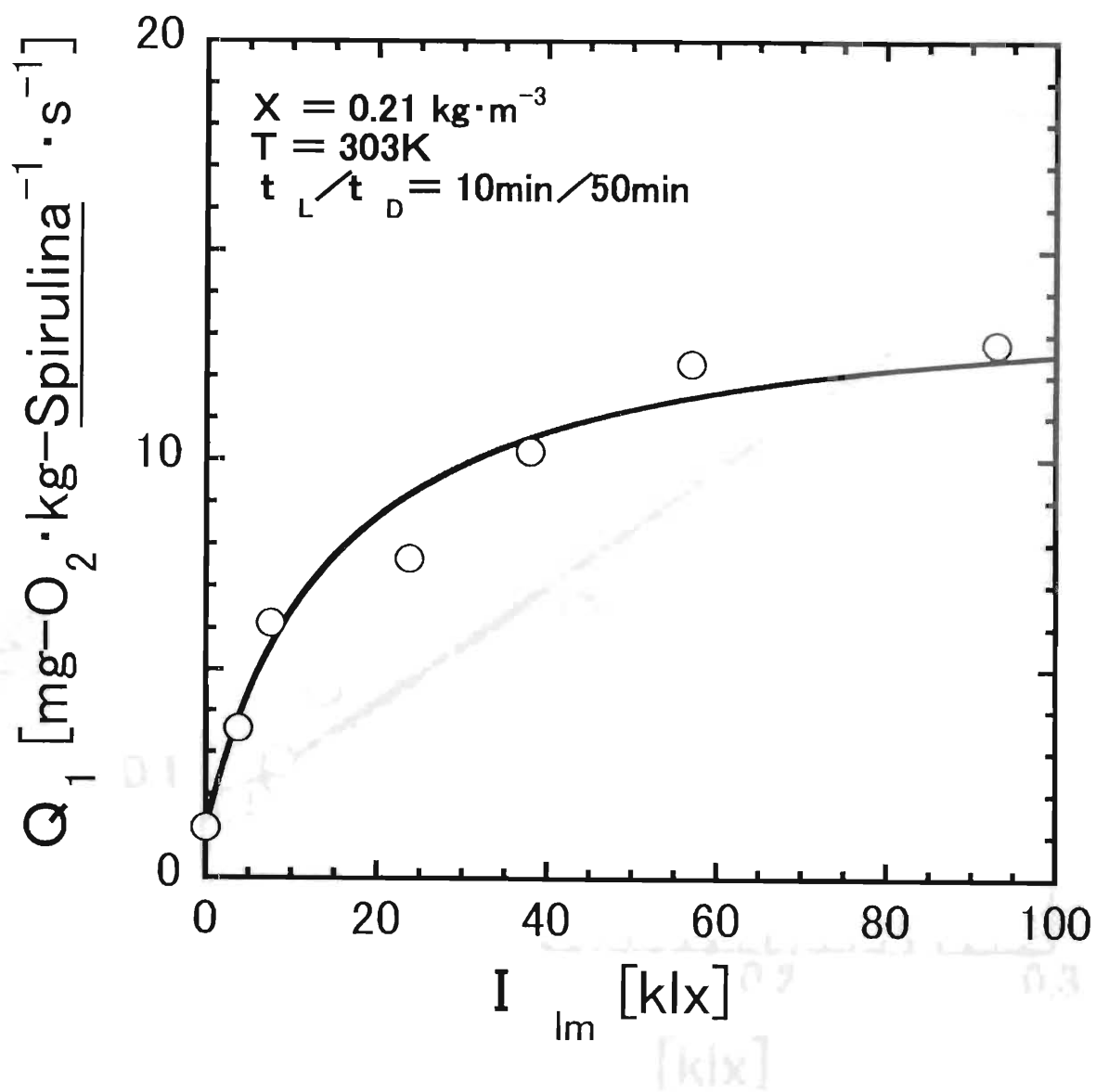


Fig.3-12 Effect of logarithmic mean intensity I_{lm} on specific respiration rate Q_1

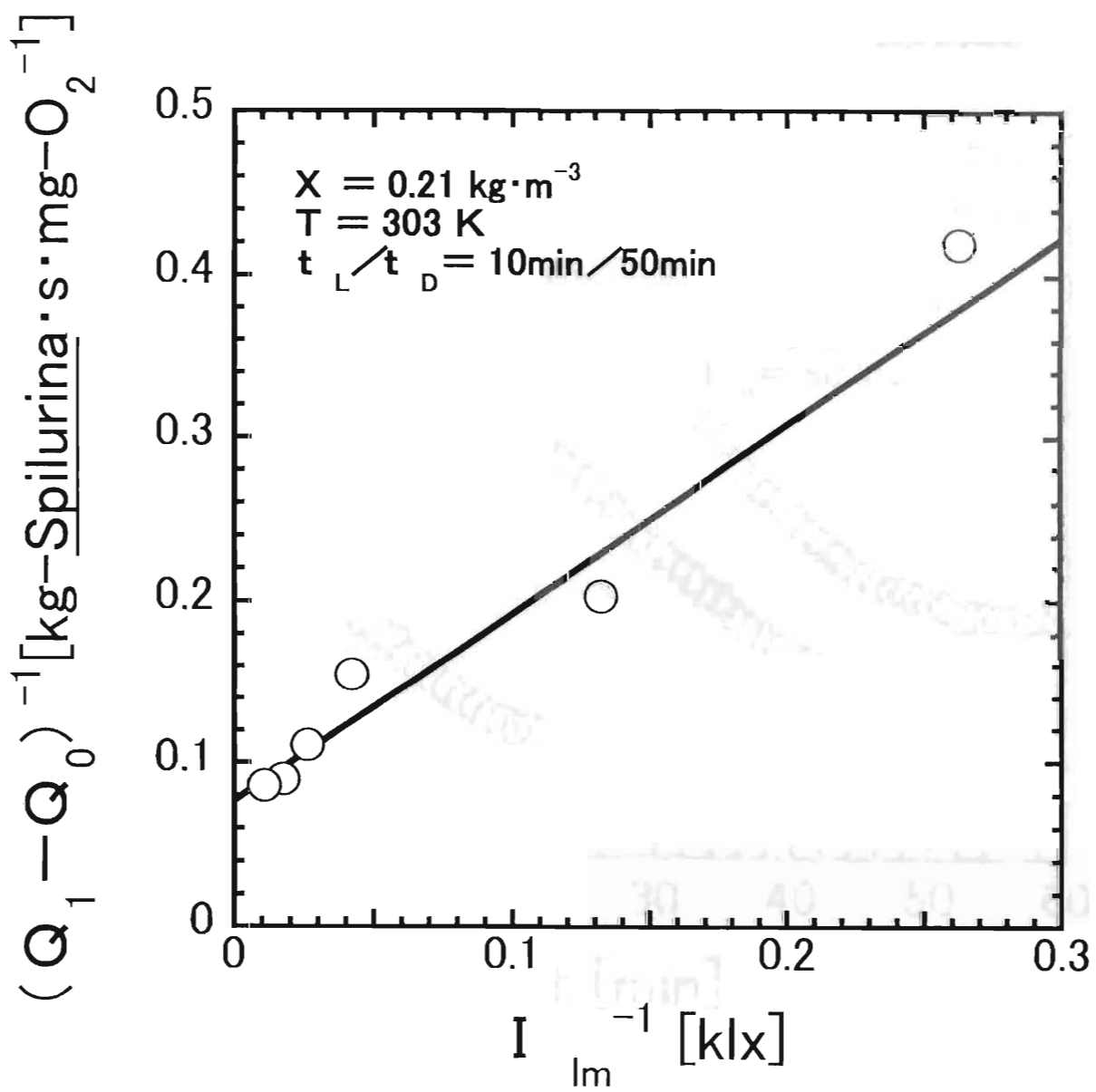


Fig.3-13 Lineweaver-Burk plot

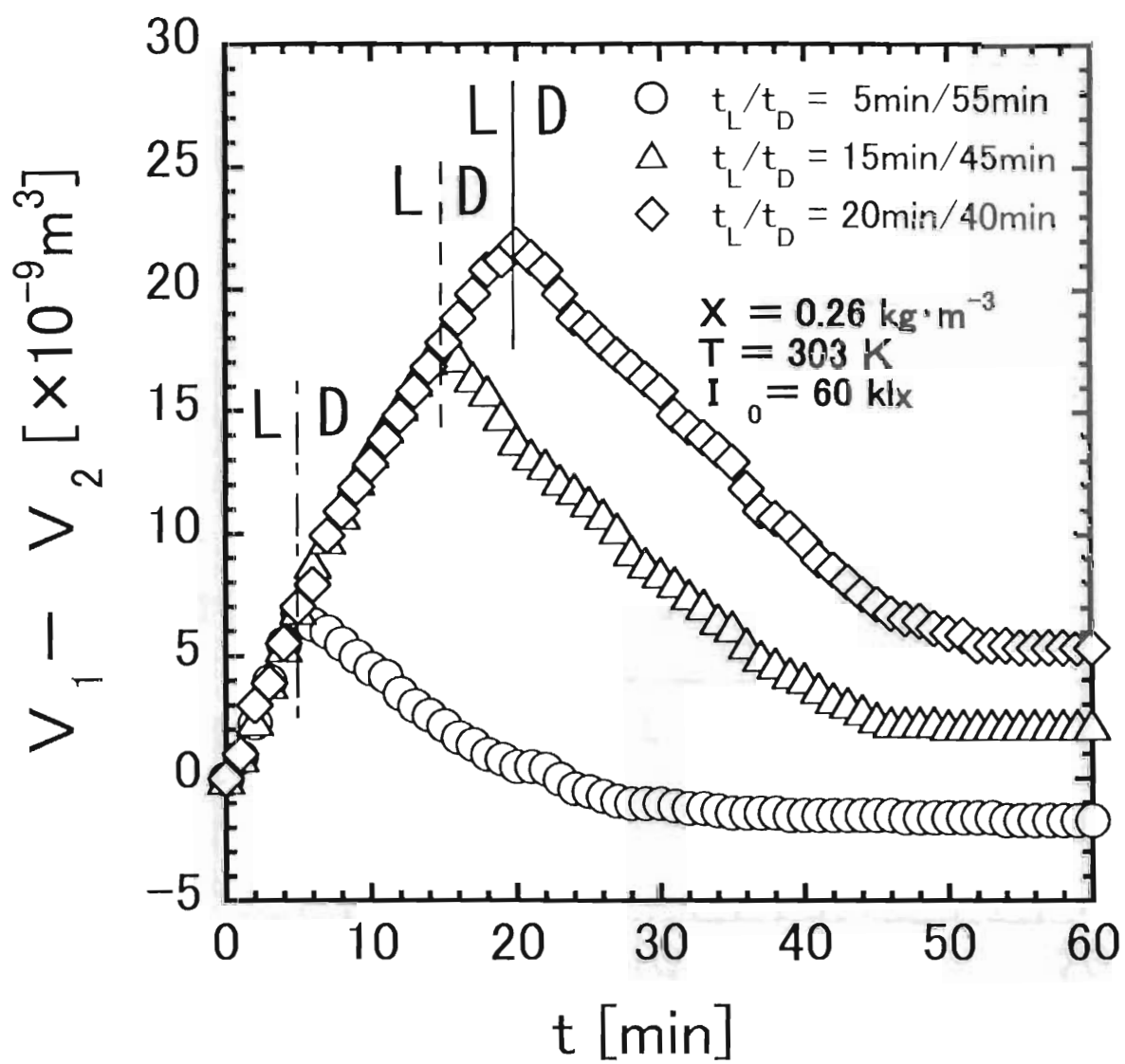


Fig.3-14 Time courses of $V_1 - V_2$ ($t_L = 5-20\text{min}$)

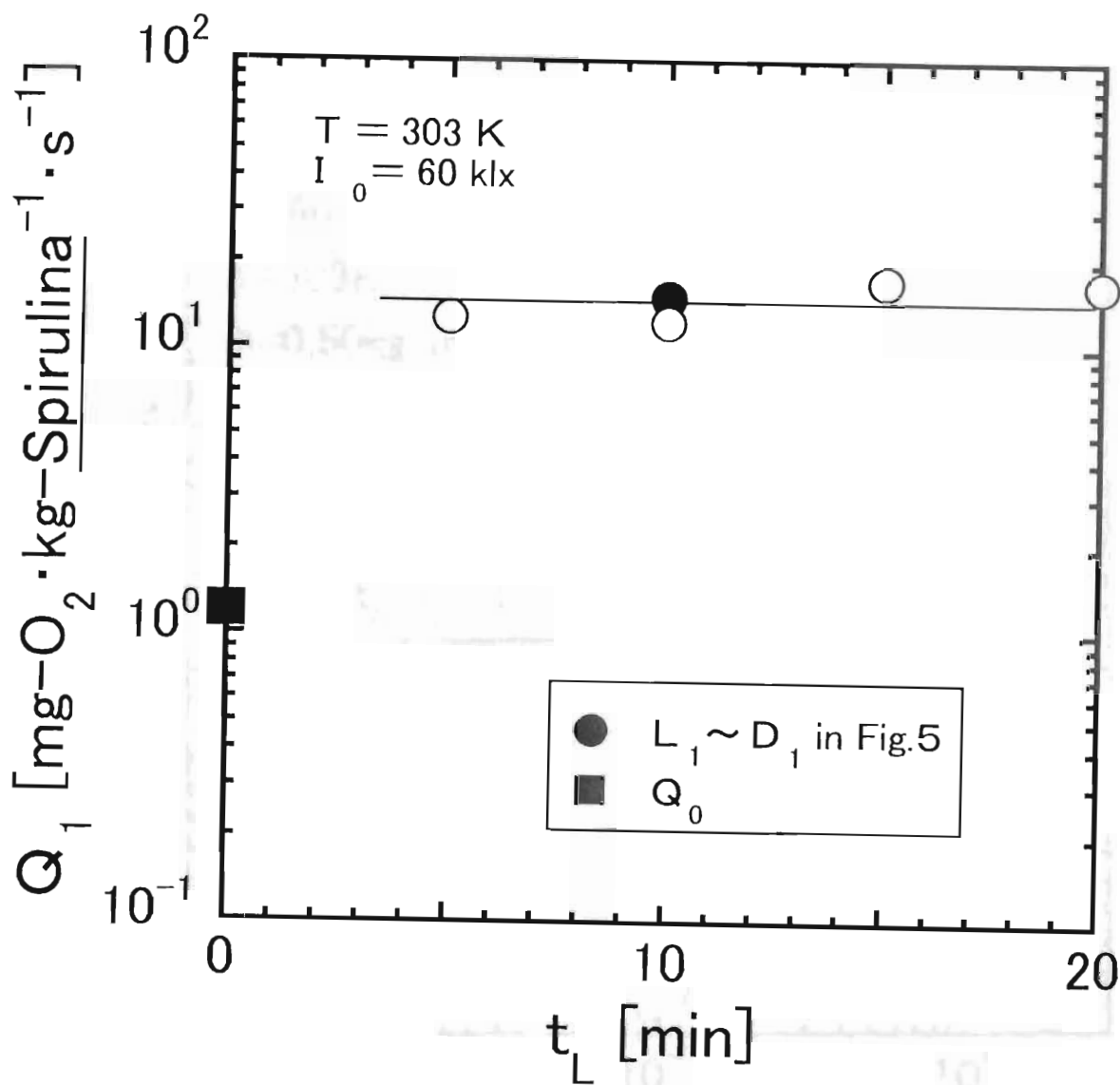


Fig.3-15 Effect of light period t_L on specific respiration rate Q_1

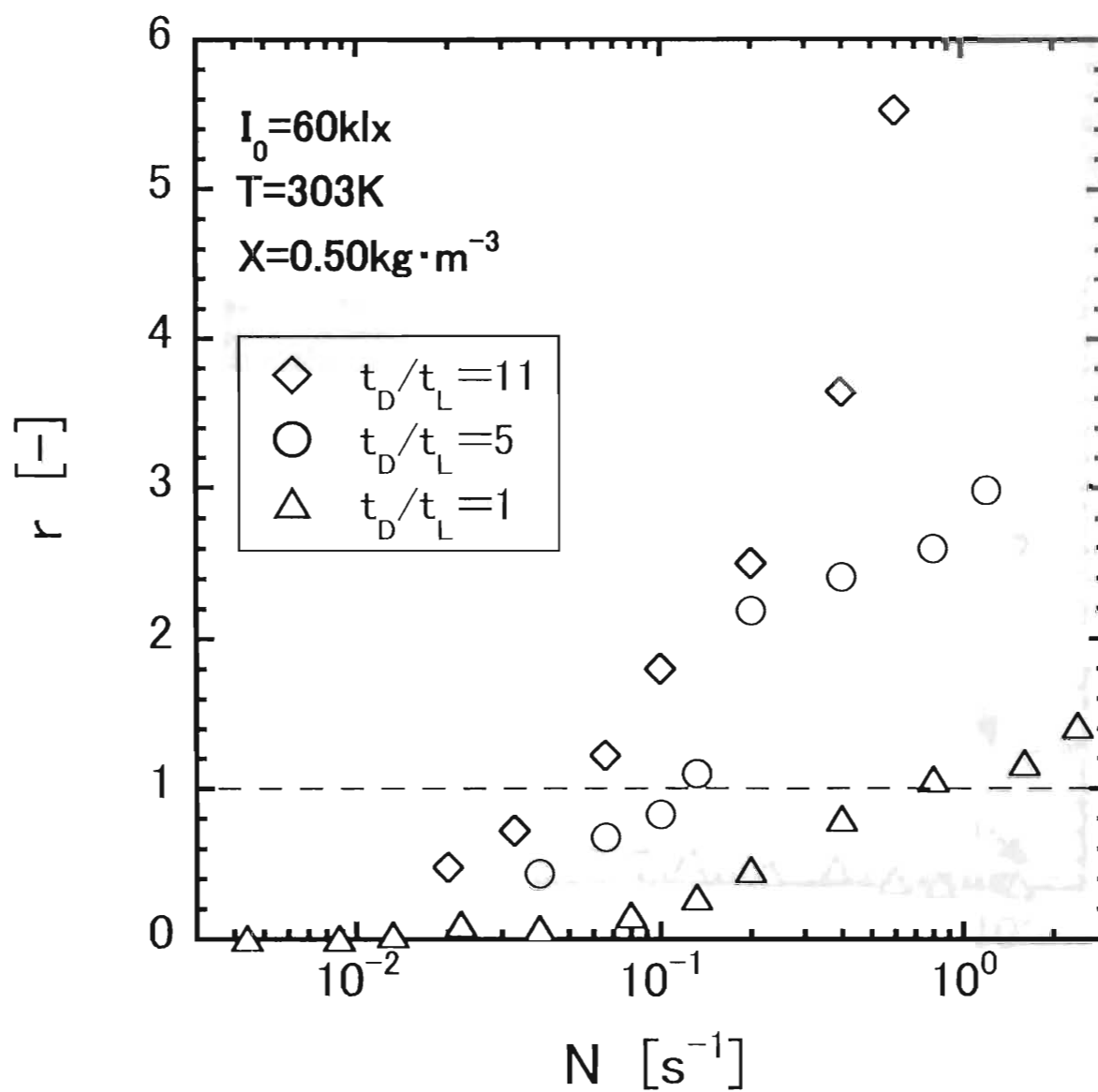


Fig.3-16 Effect of the periodicity of light on the volume ratio of oxygen produced

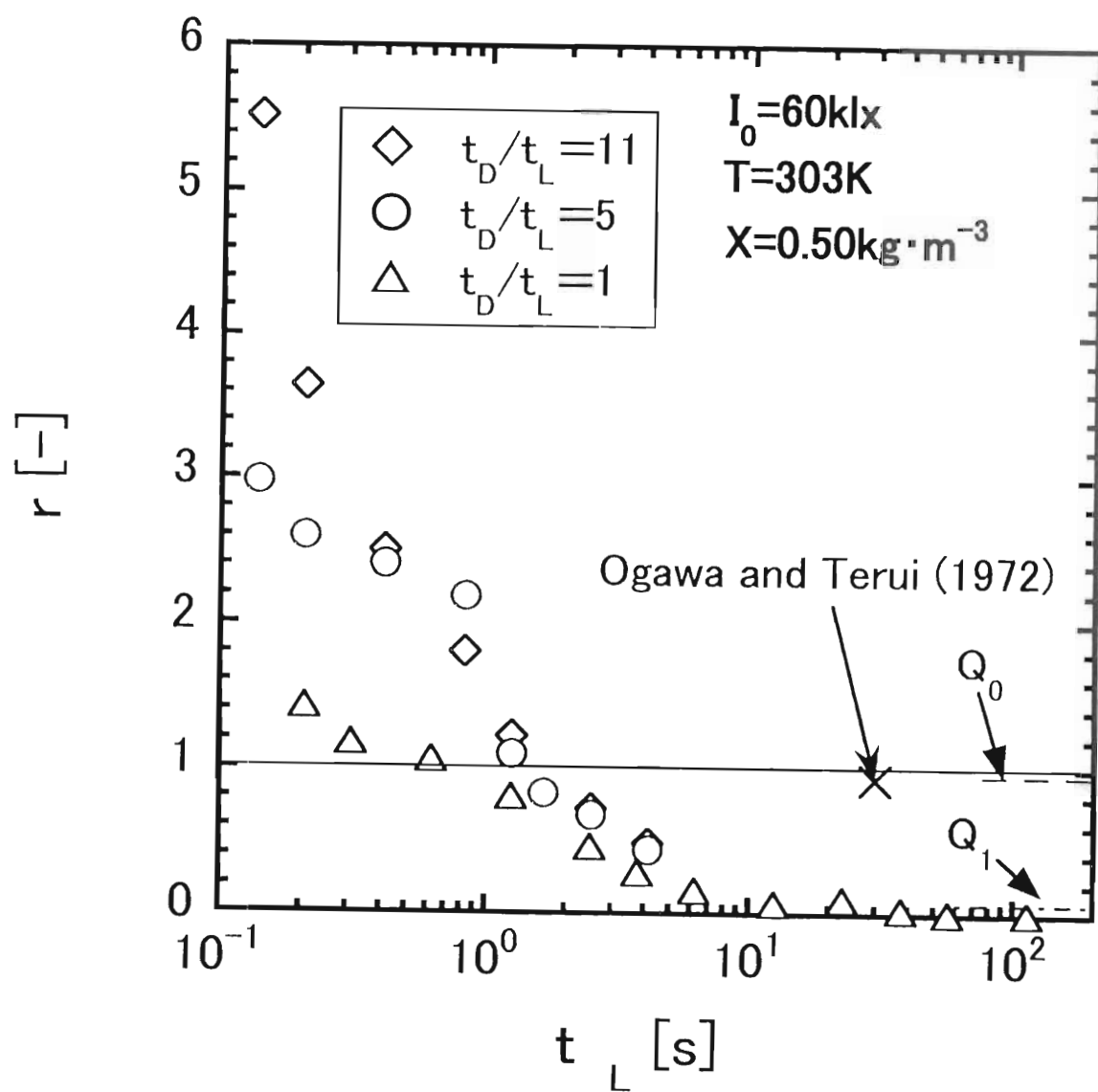


Fig.3-17 Effect of the irradiation time over a specified period on the volume ratio of the oxygen produced

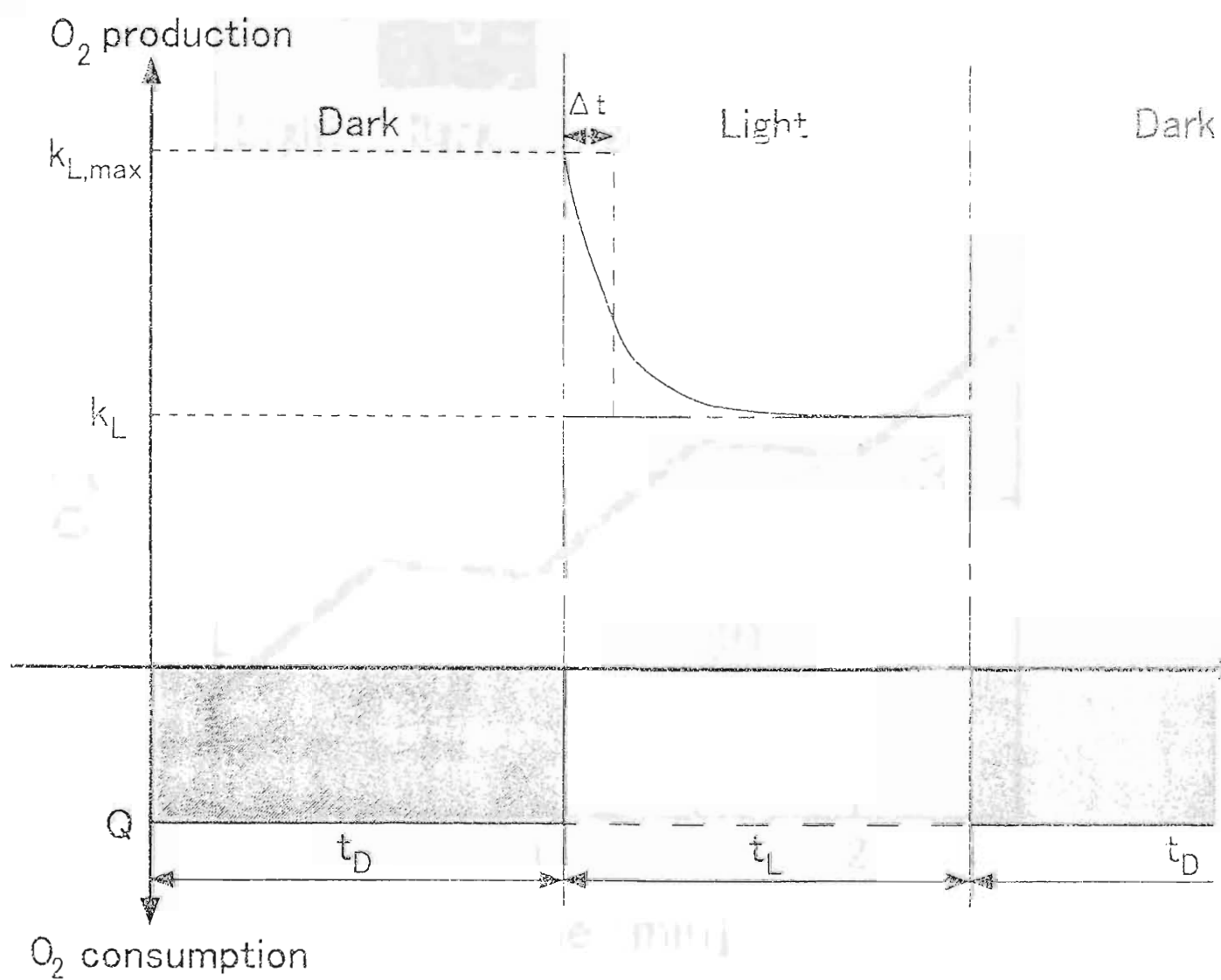


Fig.3-18 Model of oxygen production and respiration by periodic light

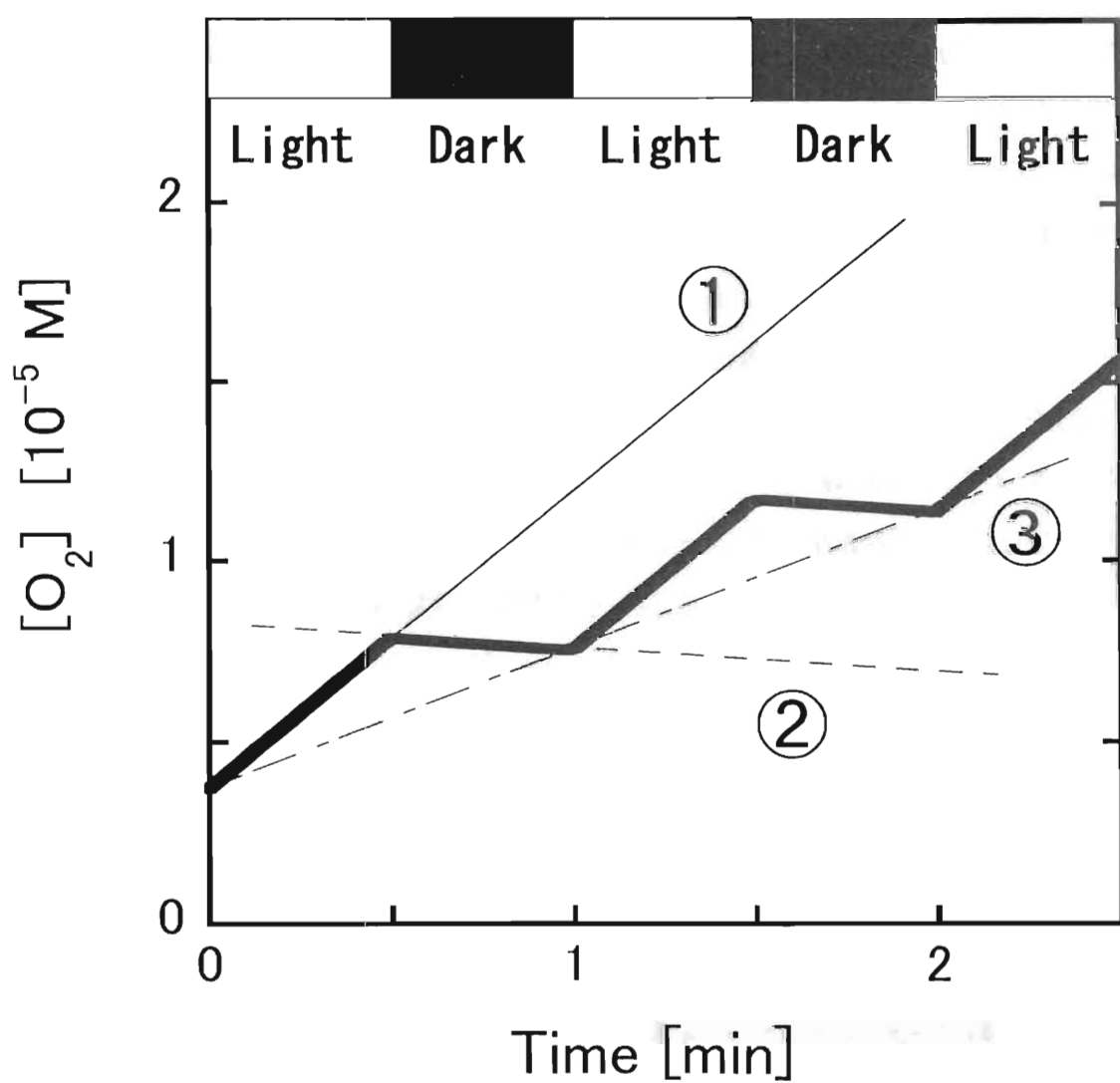


Fig.3-19 Effect of the light-dark phasing on the oxygen evolution observed by a polarographic method (Ogawa and Terui, 1972)

- ① apparent oxygen evolution rate by continuous light
- ② oxygen consumption rate
- ③ apparent oxygen evolution rate by periodic light

第4章 微小重力下における回転容器内の気液界面形状(大平ら,1999a)

1.緒言

宇宙ステーションなどの閉鎖環境系では、人間の生命活動によって発生した二酸化炭素を酸素に変換するシステムが必要である。生物学的方法による二酸化炭素の酸素への変換は物理化学的方法(Johnsonら,1993; Nitta and Yamashita,1985)に比べて、環境汚染に対する安全面で優れている。培養液中で光合成を行う藍藻スピルリナはこの目的に適した微細藻類の一つであり、食料供給源となる可能性も持っている。閉鎖環境系生命維持システムで藻体の増殖を円滑に行うため、光ファイバーを培養器内に組み込み(Oguchiら,1987,1989; Moriら,1987,1989)、藻体から発生した酸素が溶解している懸濁液をシリコン中空糸膜に通すことで懸濁液に溶解している酸素を回収する方法(Oguchiら,1987,1989; Matsumotoら,1992; Moriら,1987,1989)が地上1Gで検討されている。しかし、地上1G以外では試みられていない。また、液に溶解している酸素を回収するために中空糸膜を使用する場合、膜モジュールに懸濁液を圧送する必要がある。懸濁液の圧送は所要動力を増大させるとともに、加圧による藻体細胞の破壊を招くおそれがある。

微小重力(10^{-2} G未満)、低重力(10^{-2} - 10^{-1} G)環境では容器内に封入した液体を一定の形状に保ちにくい上、気体を液体中に供給しても気液分散系が得にくいので、気液連続操作を確保するには様々な工夫が必要である。Leslieら(1985)は無重力下において軸のない円筒容器を回転させることにより遠心力を与えた回転容器内の気液界面形状をシミュレートする式を導いている。さらに、回転容器中のエタノール-空気系について、航空機による微小重力実験の結果とシミュレーション結果がほぼ一致することを確認している。Hungら(1989)は回転中心に軸を持つ円盤形容器中の液体ヘリウムの気液界面形状を微小重力場、低重力場についてシミュレートしている。微小重力場の場合、気液界面曲線はほぼ上下対称となり、Leslieら(1985)の式から求めた気液界面曲線とほぼ同じになる。しかし、低重力場の場合は気液界面曲線が上下非対称となる。また、Imaiら(1997)は遠心力を利用した気泡除去装置に関する検討を微小重力下で行い、液中の気泡を回転中心の気体により捕捉、除去が可能であったと報告している。微小重力環境では外力が作用しないと気泡が生成しにくい(Kimら,1994)が、遠心力の作用により気泡を生成させることが可能であると考えられる。

Leslieら(1985), Imaiら(1997), Kimら(1994)の報告から、無重力または微小重力下にある培養系に低遠心力場を与えることにより、液体形状を一定に維持することができ、液中に分散した気泡を回転中心の気体へ分離・排出できるとされている。常重力1Gと同程度の遠心力場を作り出せば、これまでに地上で蓄積した技術をそのまま使用できるが、1Gの遠心力場を作るためには大規模で複雑な装置を要し、エネルギー消費も大きく、藻体への影響も懸念される。しかし、Leslieら(1985), Hungら(1989)の報告によれば、無重力または微小重力下では1Gよりもかなり小さい遠心加速度で容器の回転中心付近に気体、容器壁に液体が存在する系が形成されると予想される。しかし、気液界面が一定形状であっても気液界面と底面が接触していない場合、液中の気泡は気液界面に沿って移動し、回転中心近傍に蓄積する。蓄積した気泡が気液界面を押し上げ、最終的には培養液をも排出させてしまう可能性が高いため、安定した培養操作を行うことが困難になる。従って、液体形状は単に一定であればよいのではなくLeslieら(1985)のシミュレーションによって得られている結果、即ち、回転容器中心部に気体、容器壁全面と液体が接触し、上蓋及び底面には液体に濡れていない気固接触面があり、上下左右対称となる気液界面がスピルリナ育成環境として望ましい。

本章では、微小重力下においてスピルリナの二酸化炭素同化能力を利用した酸素供給システム開発の基礎研究として、低遠心力場を利用するスピルリナ育成環境の創成の可能性を検討するため、回転容器内の気液界面の形状を落下による微小重力実験によって観察・記録した。これらの結果から、スピルリナ育成環境に適した気液界面形状の形成に及ぼす容器回転速度、容器濡れ性、操作液量の影響について検討した。また、容器内を貫通する回転軸の有無による気液界面形状の相違についても検討を加えた。

2. 実験装置及び方法

微小重力実験用装置としては(株)地下無重力実験センター(以下「JAMIC」とする)で使用するJAMIC用縦1/2規格の装置(W425xL870xH918)及び縦1/4規格の装置(W425xL425xH918)、北海道工業技術研究所(以下「HNIRI」とする)極限環境研究棟の落下施設で使用するHNIRI用の装置(W425xL600xH918)を製作した。

実験装置の概略図をFig.4-1に示す。軽量化するためアルミアングルで枠組みを作製した。直流12V、交流100V電源としてポータブル交流電源(PAC1503R, 日本電池製)及び電池パック(BP1503R, 日本電池製)を搭載した。プログラマブルコントローラ(FP1-

C16,12V,National製)により、リレー(RT3S-12V,National製)及び組端子台(TC10S,春日電機製)を介して照明用のコードレス蛍光灯ミニ(BF-642,National製),容器回転用モータ(MSM560-501K,オリエンタルモーター製),CCDカラーカメラ(MN401,ELMO製)を制御した。容器回転用モータのスピードコントローラのみ使用電圧が24Vのため、100Vから24Vへ変換する整流器(PS3N-C24A1,idcc製)を使用した。落下実験中の容器内の気液界面を観察するため、ビデオカメラ(CCD-TR900,SONY製)又はCCDカラーカメラとビデオカセットレコーダ(GV-UX7,SONY製)で録画した。なお、CCDカラーカメラとビデオカセットレコーダを使用して撮影した場合、両者の配線間にキャラクタージェネレータ(CG-V60,Victor製)を組み込み、録画映像右上に1/100秒単位で計測時間を記録した。JAMICでは装置引き渡しから落下まで90分程度の時間を要する。装置引き渡し時からビデオカメラ,ビデオカセットレコーダによる録画を開始するため、バッテリーにNP-90D型(SONY製)を使用した。HNIRIでは実験開始から終了まで常時撮影を行うため、バッテリーにNP-12000型(SONY製)を使用した。

2.1 固定容器による実験

内径100mm,高さ65mm,容器体積 $0.51 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ の亚克力樹脂(ポリメタクリル酸メチル,以下「PMMA」とする)製の固定円筒容器を用いた。仕込み液量は液量率0.60に相当する $0.31 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ とした。液体には煮沸滅菌後放冷した常温のイオン交換水(以下「水」とする)及びエタノール(和光純薬,一級)を使用した。微小重力実験はJAMIC(公称微小重力レベル 10^{-5} G 以下,微小重力時間10秒)を使用して行った。

2.2 回転容器による実験

内径130mm,高さ100mm,容器体積 $1.30 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ のPMMA製円筒容器を用いた。容器の回転を安定させるため、容器の中心に直径18mmのステンレス鋼軸(SUS304)を通した。液体として煮沸滅菌後放冷した常温の水を用いた。疎水面を作り出すためテフロン(ポリテトラフルオロエチレン,以下「PTFE」とする)を使用し、必要に応じて軸,上蓋,底面を被覆した。水は落下約2時間前に容器に入れ、仕込み液量は液量率0.60-0.81に相当する 0.77×10^{-3} - $1.06 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 、容器回転速度は 0.70 - 0.83 s^{-1} (容器壁基準で 0.13 - 0.18 G)の範囲でそれぞれ変化させた。水面近傍の液回転速度の指標として直径約2mmの浮遊性ポリプロピレンビーズ(密度 $0.84 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)を使用した。また、底面近傍の液回転速度の指標として直径約4mmのポリエチレンビーズ(ビーズ内に銅を仕込み密度調整したもの,密度 $1.00 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)を使用した。微小重力実験はJAMIC及びHNIRI極限

環境研究棟の落下施設(公称微小重力レベル 10^{-3} G以下,微小重力時間1.4秒)を使用して行った。

また、ステンレス鋼軸を容器内から取り除いた内径130mm、高さ100mm、容器体積 $1.33 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ のPMMA製円筒容器を用い、上蓋及び底面をテフロン被覆して、気液界面形状に及ぼす軸の影響について検討を加えた。

2.3 落下による微小重力実験方法

予備実験として地上1Gで容器回転速度 0.70 s^{-1} の場合について容器上方からビデオ撮影し、ビーズの回転速度を測定した。容器底面を旋回する全てのビーズの回転速度は容器回転開始から1分後に、液表面に浮遊している全てのビーズの回転速度は4分後に容器回転速度と一致した。これより、容器の回転開始から4分で容器内の液の回転速度は半径方向、高さ方向とも一様になったと判断した。この結果に基づき、実験開始時にJAMICの制御盤から実験装置に搭載したプログラマブルコントローラに送信するデジタル信号(HNIRIで行った場合はデジタル信号と等価の短絡信号)は落下5分前とした。プログラマブルコントローラにインストールする機器類電源制御用プログラムはプログラムソフトNPST-GR(National製)をインストールしたパソコン(PC9801-RS, NEC製)で作成した。プログラマブルコントローラがデジタル信号を受信するとプログラムにより、照明、容器回転用モータ、CCDカラーカメラの電源が入り、デジタル信号受信から7分後(落下から2分後)に全ての電源が切れる。気液界面の形状を観察するため、回転容器の側面にCCDカラーカメラ又はビデオカメラを固定した。ビデオカメラ又はビデオカセットレコーダには180分用8ミリビデオテープ(P6-180HG₂, SONY製)を入れ、装置引き渡し時から180分間の連続撮影とした。微小重力実験終了後、8ミリビデオテープを回収し、VHSビデオテープ(SuperHG T-120, FUJIFILM製)にダビング(ビデオデッキ:SLV-J10, SONY製)した後、カラービデオプリンタ(UP-5000, SONY製)でプリントした。

2.4 接触角の測定

微小重力実験で使用した容器の構成材料と液体の接触角測定には自動接触角計CA-Z型(協和界面科学株式会社製)を用いた。試験液滴の体積は $4 \mu\text{l}$ とし、室温296K、湿度50%の室内で静的接触角を測定した。試験材料としてPMMA、ステンレス鋼、PTFEを用い、試験液体として水、エタノールをそれぞれ組み合わせて用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 接触角

Table 4-1に本実験系の接触角を示す。上段は自動接触角計で測定した静的接触角値で、下段は静的・動的接触角の文献値(Dekkerら,1991; Linら,1993; Murakamiら,1995; Qiao and Chandra,1997; Richter,1994; Tarasevich,1991; Yasudaら,1994)である。なお、実測した静的接触角の右のカッコ内の数字は測定回数である。液体として水を用いた場合の静的接触角は文献値とほぼ同じ範囲となった。エタノールを用いた場合、PMMAではエタノールが薄膜状になって広がり、自動接触角計では静的接触角の測定ができなかった。目視観察の結果も含めてエタノール-PMMA系の静的接触角はほぼ 0° と判断した。

3.2 固定容器内の気液界面形状

Hungら(1989)は宇宙ステーション等における液体ヘリウムの貯蔵施設を対象系として、低重力、微小重力環境で回転中心に軸を持つ容器内の気液界面曲線を求める式を提出している。しかし、軸と液体ヘリウムの静的接触角を考慮しているが、定常状態の気液界面形状を記述する式であるため、液体ヘリウムの形状が変化する際の抵抗は考慮されていない。Hungら(1989)は液回転速度が $1.7 \times 10^{-2} - 1.7 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、縦方向の残留重力レベル g_z/g_0 が $10^{-1} - 10^{-4} G$ の微小重力から低重力の範囲でシミュレーションを行っている。液回転速度 0.17 s^{-1} で縦方向の残留重力レベル g_z/g_0 が $10^{-2} - 10^{-4} G$ の低重力環境の場合、左右対称であるが、底面に気固接触面が形成されず上下非対称の気液界面曲線を得ている。一方、同じ液回転速度で縦方向の残留重力レベル g_z/g_0 が $10^{-3} G$ 以下の微小重力環境の場合、上蓋、底面とも気固接触面を形成し、ほぼ上下対称の気液界面曲線となる。また、微小重力環境で液回転速度が小さい場合、上蓋、底面に気固接触面を形成しないがほぼ上下・左右対称の気液界面となっている。低重力場で液回転速度を変化させた場合のシミュレーション結果を見ると、液回転速度が大きくなるほど上下対称の気液界面曲線になり、微小重力場では液回転速度に関係なくほぼ上下対称の気液界面曲線になっている。

本実験条件でHungら(1989)の式によるシミュレーションを行うと容器回転速度 0.70 s^{-1} ではほぼ上下対称の気液界面を形成させられると推測される。一旦、軸を包括する上下左右対称の気液界面を形成させることができれば、気液界面の形状に対して容器中央に存在する軸は無関係となる。これにより、より単純化したモデル、即ち、軸

を持たない回転容器の気液界面曲線を表すシミュレーションモデル式(Leslieら,1985)を使用することが可能となる。

Leslieら(1985)は軸を持たない回転容器について、気液界面のシミュレーションモデル式を報告している。 $\phi=dz/dr$ とおくと、気液界面での圧力差 p_L-p_G と表面張力勾配からなるLaplace方程式:

$$p_L-p_G = \sigma \nabla^2 n = -\sigma \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \frac{r\phi}{\sqrt{1+\phi^2}} \quad (4-1)$$

が成立する。また、系のエネルギー収支式:

$$p_L = p_{L,0} + \frac{1}{2} \rho_L \omega^2 r^2 - \rho_L g_z z \quad (4-2)$$

$$p_G = p_{G,0} + \frac{1}{2} \rho_G \omega^2 r^2 - \rho_G g_z z \quad (4-3)$$

が成立する。単純化するため、無重力環境($g_z=0$)を想定し、気液密度差 $\rho_L-\rho_G$ を ρ とおいて、境界条件:

$$\text{B.C.1} \quad z=z_0, \quad r=r_0, \quad \phi=\tan \theta$$

$$\text{B.C.2} \quad z=z_0/2, \quad r=R, \quad \phi=-\infty$$

で解き、次式を得ている。

$$z = \int_1^r \frac{\phi}{\sqrt{1-\phi^2}} dr \quad (4-4)$$

ここで、 ϕ は積分パラメータであり、

$$\phi = \frac{1 - \hat{r}_0 \sin \theta + We^*(1 - \hat{r}_0^4)}{1 - \hat{r}_0^2} \frac{\hat{r}_0^2 - \hat{r}^2}{\hat{r}} + \frac{We^*(\hat{r}^4 - \hat{r}_0^4)}{\hat{r}} - \frac{\hat{r}_0 \sin \theta}{\hat{r}}$$

である。Leslieら(1985)はPMMA,ポリカーボネートで作られた軸を持たない回転容器にエタノールを入れ、航空機による微小重力実験を行っている。Leslieら(1985)の微小重力実験の結果はシミュレーション結果とほぼ一致しており、本実験で目的とするスピリナ育成環境が形成されている。

本実験でもEq.(4-4)を使用して以下の方法で気液界面曲線を求めた。Weber数 We^* , 水-PMMA系または水-PTFE系の静的接触角 θ をEq.(4-4)に代入し、Eq.(4-4)が実数解を持つ、即ち右辺の分母が実数となる条件:

$$1-\phi^2>0$$

を満たす最小の気固接触半径 r_0 を求め、4次のRunge-Kutta法により無次元化された気液界面曲線を数値的に求めた。次に無次元化された気液界面曲線を z 軸に対して回転させ、気体の最大半径 R を仮定して求めた気体体積と、軸が無いとした場合の容器体積 V_1 と仕込み液量 V_L の差から求めた気体体積 $V_1 - V_L$ と照合した。気体体積が一致した際の気体最大半径 R を使用し、気液界面曲線を求めた。また、最大気体半径 R と仮定したWeber数 We^* から液の角速度、液の回転速度を算出した。Weber数 We^* を様々変化させ、算出した液の回転速度と微小重力実験を行った容器回転速度が一致するまで計算を行った。Leslieら(1985)が仮定しているように液回転速度と本実験の容器回転数が同じであるとして、各容器回転速度ごとに気液界面曲線をシミュレートした。

JAMIC及びHNIRIの落下カプセルに作用する重力加速度の一例をFig.4-2に示す。縦軸は落下装置内に設置された重力計の値 g と標準重力加速度 g_0 の比($=g/g_0$)、即ち残留重力レベルである。提供されたデータを図にすると、前後方向(x 方向)、左右方向(y 方向)、上下方向(z 方向)のデータが重なる。前後方向、左右方向のデータを見やすくするため、数値を加算して示した(JAMIC: x 方向0.004, y 方向0.002、HNIRI: x 方向0.04, y 方向0.02)。JAMIC,HNIRIとも z 方向の残留重力レベル g_z/g_0 は落下直後から0Gを挟んで振動した。変動幅はJAMICで $\pm 10^{-4}G$ 、HNIRIで $\pm 10^{-3}G$ のオーダーであった。

微小重力下における固定容器内の液体と気体の挙動については、一般に容器内面が液体に濡れやすい場合、液体は容器内面に付着し、容器中心に球状の気泡ができる。一方、容器内面が液体に濡れにくい場合、容器中心に球状の液体ができるとされている。水-PMMA系、エタノール-PMMA系の静的接触角 θ は実測値でそれぞれ63-74°,約0°であり、容器内面が水及びエタノールに濡れやすいため、両系とも容器中心に球状気泡が形成されると予想される。PMMA製の固定円筒容器中の水、及びエタノールの微小重力下における挙動をFig.4-3に示す(JAMIC)。エタノールの場合、微小重力環境になると液が壁に沿って上昇し、約3秒後に球状気泡が形成された。しかし、水の場合は落下から10秒経過しても気液界面に変化はなかった。これは容器内面が液体に濡れやすいか否かだけでは説明できない。後述する気液の初期状態やPMMAに対する水、エタノールの前進接触角 θ_a 、後退接触角 θ_r (Kondo and Suzuki,1992)の大きさが関与しているものと思われる。

3.3 容器回転速度の影響

Eq.(4-4)から求められた気液界面曲線は、容器中心に気体、容器壁に液体が存在し、上蓋と底面で半径 r_0 の気固接触面を持ち、上下左右対称となる。これは本報で目的とするスピルリナ育成環境に適した気液界面形状である。容器回転速度 0.70s^{-1} の場合、Eq.(4-4)から気液界面曲線が得られる液量率は0.87以下となる。本研究では余裕を見て試算値よりも若干小さい液量率0.81で微小重力実験を行った。

液量率0.81,容器回転速度 0.70s^{-1} (容器壁基準で0.13G),JAMICで行った微小重力実験の結果をFig.4-4に示す。上記の条件にEq.(4-4)を適用して気液界面曲線を求める場合、Weber数 We^* は0.93となる。落下開始とともに水が円筒容器壁に沿って上昇し、軸に沿って気液界面が降下した。水はさらに上昇し、上蓋に達した水は上蓋に沿って中心部へ移動した。気液界面は底面に最接近した後、上昇,降下を繰り返しながら約5秒以降は左右対称のほぼ一定の形状となったが、気液界面形状はLeslieら(1985)のモデルから予測した形状とは異なり、微小重力実験中に底面と接触せず、上下非対称であった。

次に容器回転速度を大きくして同様の微小重力実験を行った。液量率0.81,容器回転速度 0.83s^{-1} (容器壁基準で0.18G), JAMICで行った微小重力実験の結果をFig.4-5に示す。この条件はEq.(4-4)で気液界面曲線を求める場合、Weber数 We^* は1.3となる。時間の経過と共に水が容器壁に沿って移動し、軸に沿って気液界面が降下した。微小重力環境になった直後の気液の挙動は容器回転速度 0.70s^{-1} の場合とほとんど同じであったが、気液界面が底面に最も接近するまでに要した時間は短くなり、気液界面は底面により接近した。これは、容器回転速度の増加によって、液体の持つ運動エネルギーが増加したためであると考えられる。約5秒以降は左右対称のほぼ一定の形状となったが、容器回転速度 0.70s^{-1} 同様、気液界面が底面と接触せず、上下非対称となった。気液界面の最下点の経時変化をFig.4-6に示す。図中の●,◆で示されたkeyは容器回転速度0.70, 0.83s^{-1} で落下後に現れる最初の極小値である。破線は●、実線は◆を基準とした線、一点鎖線は地上1Gでの液面位置、即ち時刻0sにおける気液界面の位置を示す線である。5秒以降は最下点の変動はほとんどなく、落下直後の極小値(●,◆)とほぼ同じとなる。落下直後の最下点が0より大きい、即ち、落下直後に気液界面が底面と接触しない場合は、その後も気液界面と底面が接触しない。逆に落下直後の極小値が0、即ち、落下直後に気液界面が底面と接触する場合、一時的に気液界面と底面が離れることがあっても、時間の経過とともに気液界面と底面が再び接触すると考えら

れる。これより、落下直後の気液界面の最下点を指標としてその後の気液界面の形状を推測できる。同図中には、液量率0.81、容器回転速度 0.70s^{-1} でHNIRIで行った微小重力実験の結果を Δ で示した。○と Δ はほぼ同じ変化を示し、HNIRIで行った微小重力実験の結果はJAMICの場合とほぼ同じであった。これより、本実験において操作条件を同一とした場合、気液界面の挙動は落下施設による違いがないことがわかった。

液量率0.81,容器回転速度 0.70s^{-1} の場合について、Leslieら(1985)の式から求めた気液界面曲線をFig.4-7に実線で示す。水-PMMA系の静的接触角 θ は 72° を用いた。同図中にFig.4-4の9.17秒後における気液界面をプロットした。気体の最大半径 R ,底面の気固接触面の有無など、微小重力実験の結果とLeslieら(1985)の式から求めた気液界面曲線は一致していない。見かけ上、微小重力実験の結果はHungら(1989)の低重力,高回転速度の場合の気液界面曲線と類似した形状になる。しかし、Hungらの場合は縦方向の残留重力レベルの影響で上下非対称となっているが、本実験の場合は縦方向の残留重力レベルはほぼ0Gである。本実験条件はHungら(1989)の条件とは異なり、Leslieら(1985)の計算条件に対応している。次に本実験結果と既往のモデルとの相違点について考察する。

3.4 初期条件の影響

Leslieら(1985)の検討した系と本実験系の相違点として、まず初期状態の違いが挙げられる。Fig.4-8にLeslieら(1985)の微小重力実験及びシミュレーション結果、Hungら(1989)のシミュレーション結果、及び本実験結果の概略を示す。Leslieらは航空機による微小重力実験で、円筒容器にエタノールを入れて回転させている。Fig.4-3に示したように、エタノールの場合は系に遠心力を与えなくても容器中心に球状気泡が形成される。Leslieら(1985)の実験系ではエタノールを使用していることから、時刻0sで容器中心に球状気泡が存在し、その気泡が遠心力によって変形すると仮定できる。しかし、本実験では重力場からの変化を観察していること、Fig.4-3に示すように水の気液界面形状に変化はなかったことから、本実験系では時刻0sにおいて気体は容器上部に存在する。液体として水を用いた本実験条件はLeslieら(1985)の行った実験と同条件とは言えない。ここで、エタノール-PMMA系の前進接触角 θ_a は未知であるが、一般に静的接触角 θ と前進接触角 θ_a はほぼ同じであるとされている。Table 4-1の水系でも $\theta \approx 0$ という結果が得られており、エタノール-PMMA系の前進接触角 θ_a はほぼ 0° であると予想される。これに対し、水-PMMA系の前進接触角 θ_a は $68-72^\circ$ であり、エタノ

ールは水に比べてPMMAを濡らしやすい。そのため、時刻0sにおける気液の状態に違いが生じ、Eq.(4-4)から求めた気液界面曲線と微小重力実験の結果に差が生じたと考えられる。

3.5 容器濡れ性の影響

もう一つの相違点として回転中心にある軸の有無が挙げられる。Leslieら(1985)は回転軸を持たない回転容器が対象となっているが、本実験では回転を安定させるために水に濡れやすいステンレス鋼軸を容器内に貫通させている。そのため、形状変化の際にステンレス鋼軸から水を剥離させる仕事分だけエネルギーロスがあり、気液界面が底面まで到達しなかったと考えられる。そこで、軸をPTFEで被覆することにより濡れ性を親水性から疎水性に変化させ、エネルギーロスを減少させる試みを行った。同様に底面、上蓋についても疎水性面として流動抵抗の低減を試みた。なお、容器壁については視界が遮られるためPTFE被覆は行わなかった。

微小重力下で液量率0.81、容器回転速度 0.70s^{-1} とし、軸のみをPTFE被覆した場合をFig.4-9-(a)、軸、底面をPTFE被覆した場合をFig.4-9-(b)、軸、底面、上蓋をPTFE被覆した場合をFig.4-9-(c)に示す(HNIRI)。全条件とも、Fig.4-4のPTFE未被覆の場合同様、気液界面は時間とともに降下し、約1秒後に最も底面に近づいた。その後、上昇、降下を繰り返した。PTFE未被覆の場合に比べて、軸をPTFE被覆した場合、気液界面がより底面に近づいた。Table4-1に示すように水-PTFE系の静的接触角 θ は 94° - 126° 、水-PTFE系の後退接触角 θ_r は 88° - 95° と報告されており、水-ステンレス鋼系の静的接触角(61° - 90°)よりも大きい。従ってステンレス鋼軸をPTFE被覆した場合、水が剥離しやすくなるため気液界面がより底面に近づいたと考えられる。しかし、軸、底面をPTFE被覆した場合、軸、底面、上蓋をPTFE被覆した場合とも、軸のみをPTFE被覆した場合とほぼ同様の変化を示した。底面のPTFE被覆については、気体と底面が接触しなかったため底面を疎水性にした効果が得られなかったものと考えられる。上蓋のPMMA面をPTFE被覆した場合については、前進接触角 θ_a の変化が大きくないため、ほとんど影響が見られなかったものと思われる。以上のことから、軸をPTFE被覆することにより、気液界面が底面により近づくことが示された。

3.6 液量率の影響

次に液量率を0.60に減少させて微小重力実験を行った。軸、底面をPTFE被覆し、液量率0.60、容器回転速度 0.70s^{-1} としてJAMICで行った微小重力実験の結果をFig.4-10に

示す。この条件をEq.(4-4)に適用し、気液界面曲線を求める場合、液量率の減少により気体の最大半径 R が大きくなるため、 We^* は2.4となる。落下開始から気液界面は軸に沿って降下を始め、底面と接触した。その後、気液界面と底面が離れかけたが、落下終了まで気液界面は底面と接触しており、ほぼ同じ形状であった。また、約6秒後からは底面にも気体とPTFEシートの接触面が確認され、本研究の目的であるスピルリナ育成環境に適した気液界面の形成が確認された。Eq.(4-4)により求めた気液界面曲線をFig.4-11に破線で示す。上蓋の静的接触角(水-PMMA系)として 72° 、底面の静的接触角(水-PTFE系)として 110° を用いた。また、同図中にFig.4-10の9.71秒後の気液界面をプロットした。微小重力実験の結果と気液界面曲線を比較すると底面近傍では気液界面の形状が大きく異なる。気液界面の形状が変化する際、軸と底面に対しては液体が剥離し、上蓋に対しては濡れが進行する。静的接触角 θ ではなく、動的接触角、即ち前進・後退接触角 θ_a, θ_r が適当であると考え、上蓋には水-PMMA系の前進接触角 θ_a として 72° を、底面には水-PTFE系の後退接触角 θ_r として 88° を使用して求めた気液界面曲線をFig.4-11に実線で示す。実線で示した気液界面曲線と微小重力実験の結果は一致していない。試みにEq.(4-4)による計算線と測定した気液界面が一致するように前進・後退接触角 θ_a, θ_r を定めると、上蓋(水-PMMA系)は約 90° 、底面(水-PTFE系)は約 35° となる(Fig.4-11,一点鎖線)。上蓋は既報文の前進接触角よりも大きく、底面は既報文の後退接触角 θ_r よりも小さい。後退接触角 θ_r が文献値よりも小さくなった原因については初期状態やテフロン親水化の影響が考えられる。

3.7 軸の影響

気液界面が変形する際に、ステンレス鋼軸が抵抗になっていると予想されるため、回転容器内から軸を取り除いた容器を用いて同様の実験を行った。液量率0.60, 容器回転速度 $0.70s^{-1}$ の条件で行ったJAMIC落下実験の結果をFig.4-12に示す。落下すると直ちに容器壁に沿って水が上昇し、回転中心付近の気液界面が降下した。その後、水が容器壁及び上蓋、底面の一部をぬらし、回転中心部に空気相が存在する中空回転液層の形成を確認した。Fig.4-13にLeslieら(1985)の式から求めた気液界面曲線と本実験結果($t=9.43s$)を示す。両者は厳密に一致しなかったが、軸が存在する場合に比べ、実験結果がシミュレーション結果に近い。

以上の結果より、水を使用した場合、気液界面の形状はLeslieら(1985)の式から求めた気液界面曲線とは厳密に一致しないが、回転容器内の軸をPTFE被覆または撤去し、

液量率0.60,容器回転速度 0.70s^{-1} (容器壁基準で0.13G)以上とすることにより、目的とする中空回転液層をつくり出すことができる。

4. 結言

スピルリナの二酸化炭素同化能力を利用した酸素供給システム開発を目的として、微小重力下におけるスピルリナ育成環境の創成の可能性を検討した。回転容器内の水-空気系の気液界面形状を微小重力実験によって観察・記録し、以下のことがわかった。

(1) 微小重力下では回転容器内の気液界面形状は直ちに変化し、約5秒後にほぼ一定の形状となり、実験終了までその形状を維持した。また、落下直後に気液界面と底面が接触しない場合、その後も接触しなかった。

(2) 液量率0.87以下の場合、Eq.(4-4)で示されるLeslieら(1985)のモデル式による計算結果からは上下左右対称の気液界面曲線が得られると予想されたが、液量率0.81で微小重力実験を行った結果、回転容器底面に気固接触面が形成されず、スピルリナ育成環境に適した気液界面形状を形成できなかった。

(3) ステンレス鋼軸をPTFEによって被覆し、濡れ性を変化させたところ、未被覆の場合に比べて気液界面が底面に接近した。液量率を0.60に減少させた場合について微小重力実験を行ったところ、約1秒後に気液界面は底面と接触した。落下から約6秒後に円筒容器底面に空気とPTFEの接触面が形成され、左右対称,上下非対称ではあるが、目的とする中空回転液層を形成させることができた。

(4) 軸を取り除いた容器を用いた場合、気液界面形状はLeslieら(1985)のモデル式による計算結果と若干異なる結果が得られた。しかし、この場合においても目的とする中空回転液層を形成させることができる。

Table 4-1 Contact angle

Liquid	Solid	θ_{a}	θ	θ_{c}
Water	Acryl resin (PMMA)	68-72	63-74 (35) 67-74	22-36
	Stainless steel (SUS304)		70-88 (69) 61-90	
	Teflon (PTFE)	95-117	95-124(8) 94-126	88-95
Ethanol	Acryl resin (PMMA)		≈ 0 (1)	
	Stainless steel (SUS304)		--- (0)	
	Teflon (PTFE)		32-34 (2)	

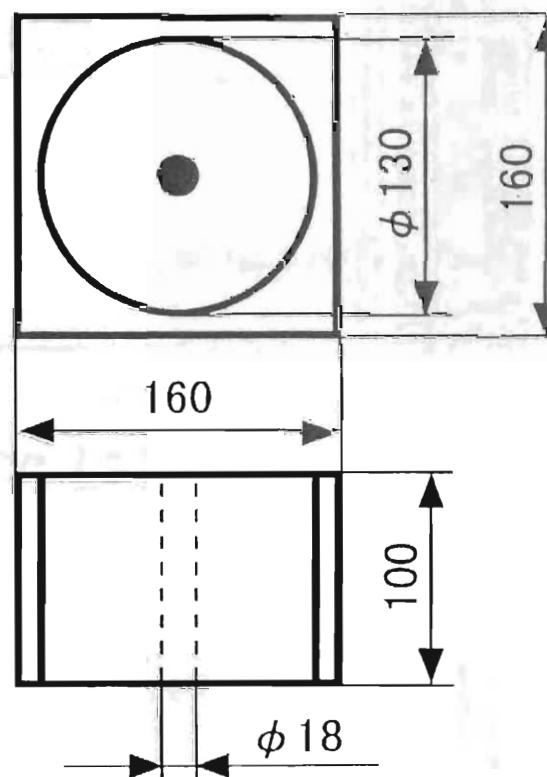
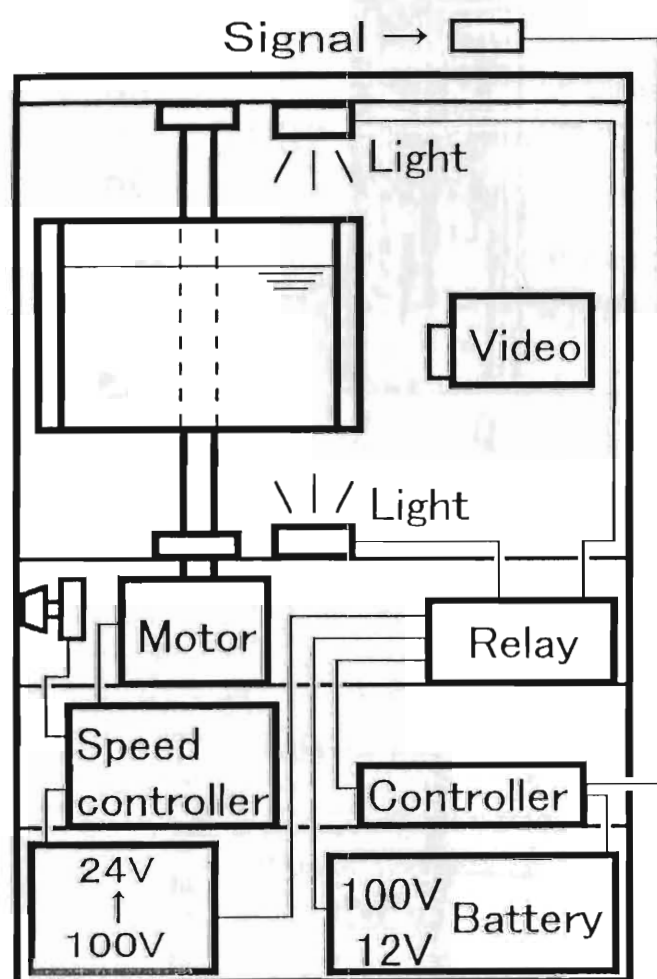


Fig.4-1 Schematic diagrams of experimental setup

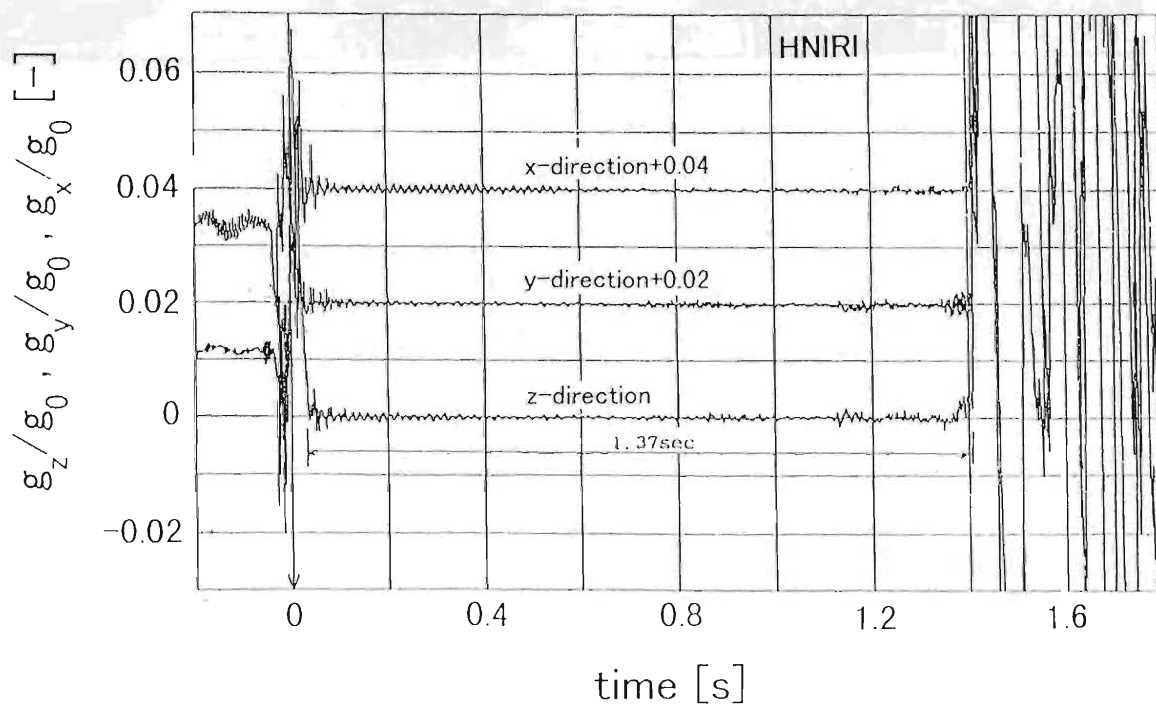
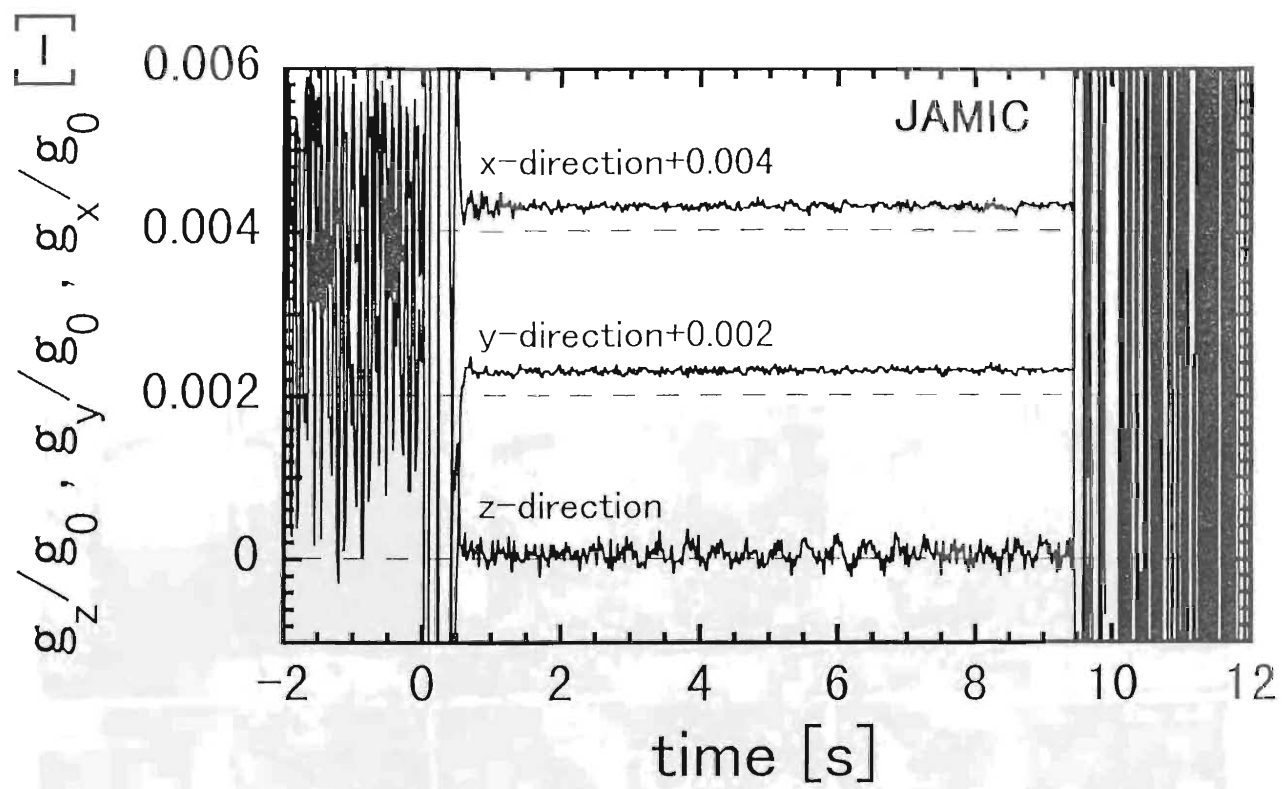


Fig.4-2 Typical data of gravity level

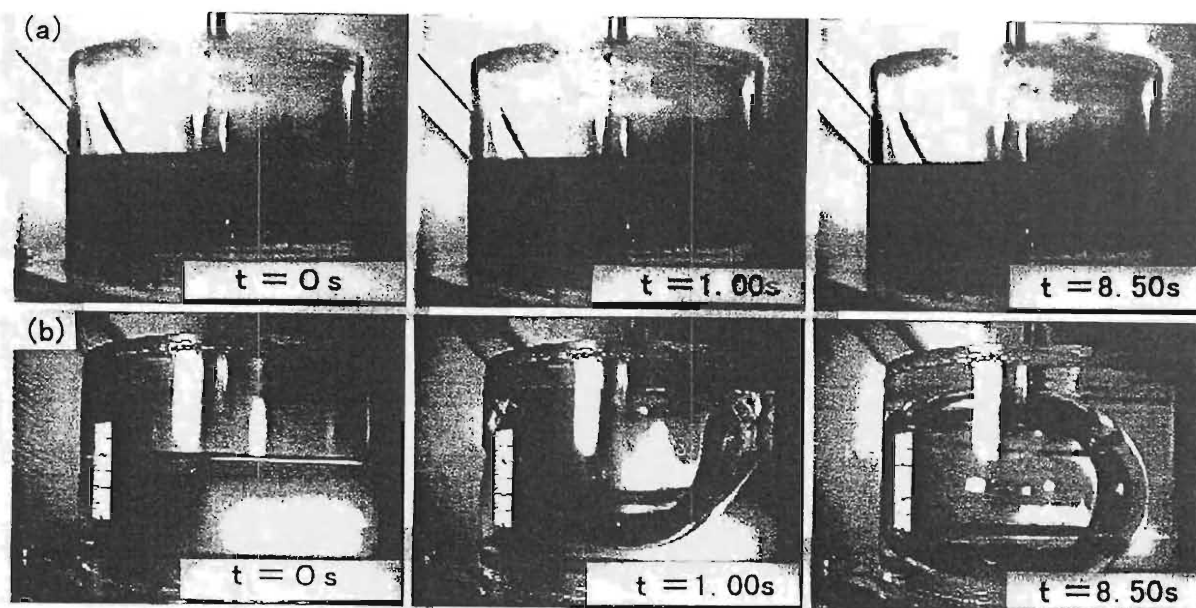


Fig.4-3 Air-water and air-ethanol interface shape at various drop times

Bottom : PMMA, Cover : PMMA

$D_r=100\text{mm}$, $H=65\text{mm}$, $N=0\text{s}^{-1}$, $\varepsilon_L=0.60$, JAMIC

(a)air-water system

(b)air-ethanol system

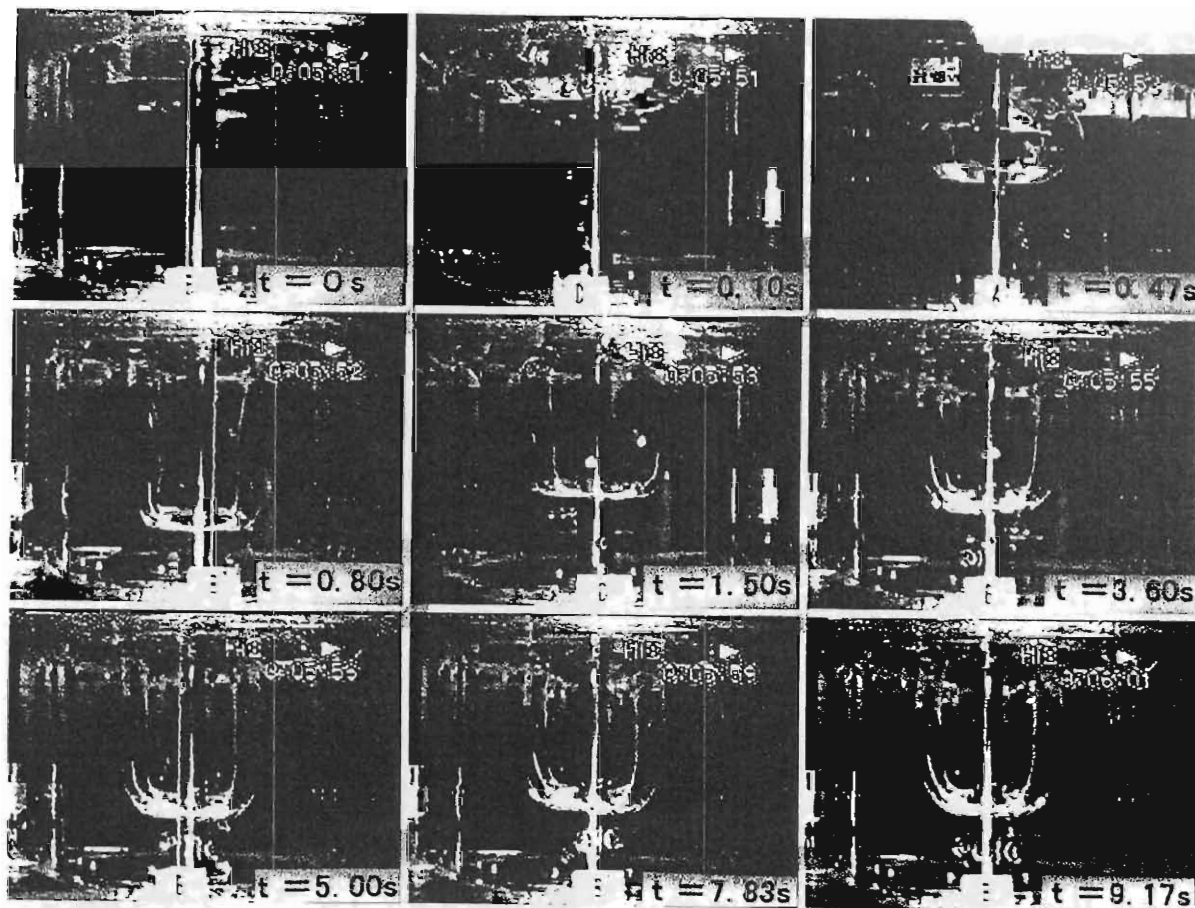


Fig.4-4 Air-water interface shape at various drop times
 Shaft : SUS304, Bottom : PMMA, Cover : PMMA
 $D_t=130\text{mm}$, $H=100\text{mm}$, $N=0.70\text{s}^{-1}$, $\varepsilon_t=0.81$, JAMIC

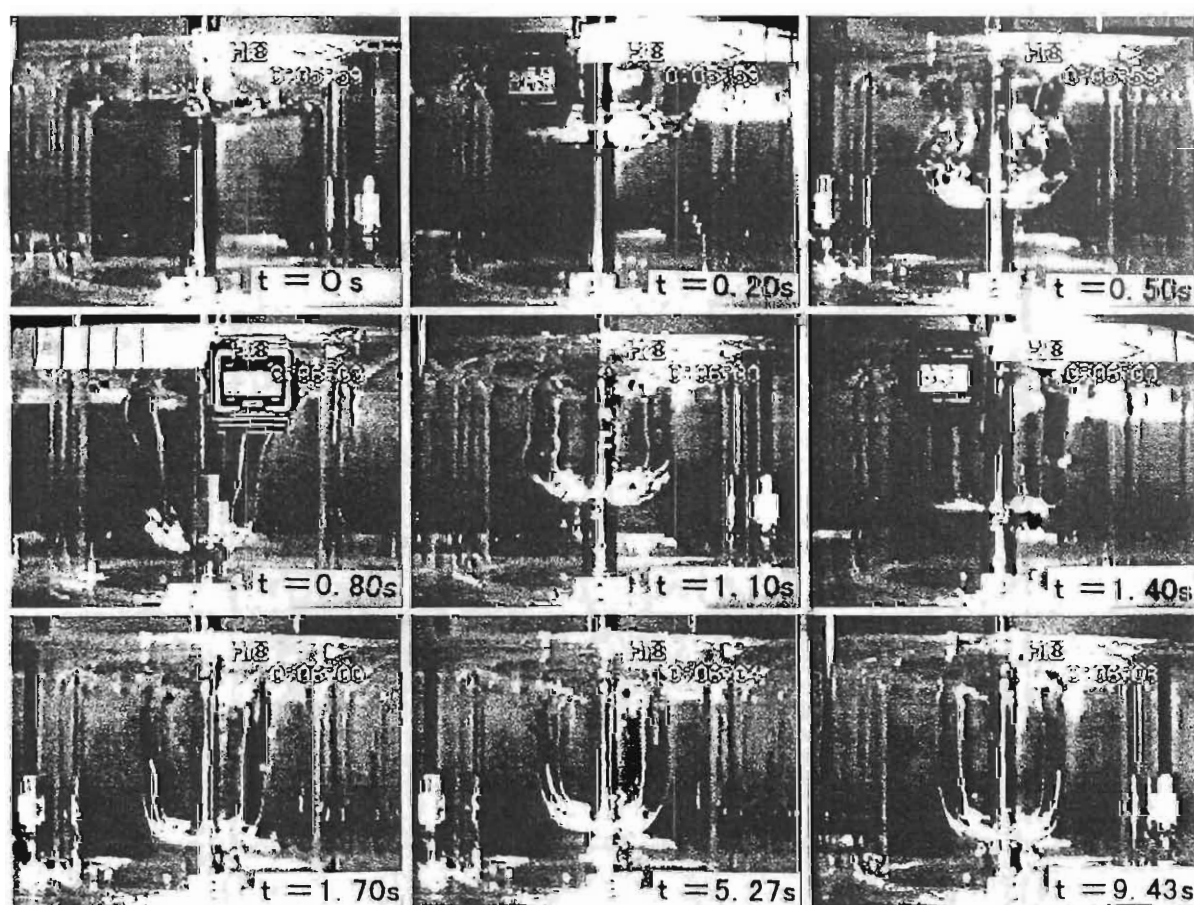


Fig.4-5 Air-water interface shape at various drop times
 Shaft : SUS304, Bottom : PMMA, Cover : PMMA
 $D_i=130\text{mm}$, $H=100\text{mm}$, $N=0.83\text{s}^{-1}$, $\epsilon_i=0.81$, JAMIC

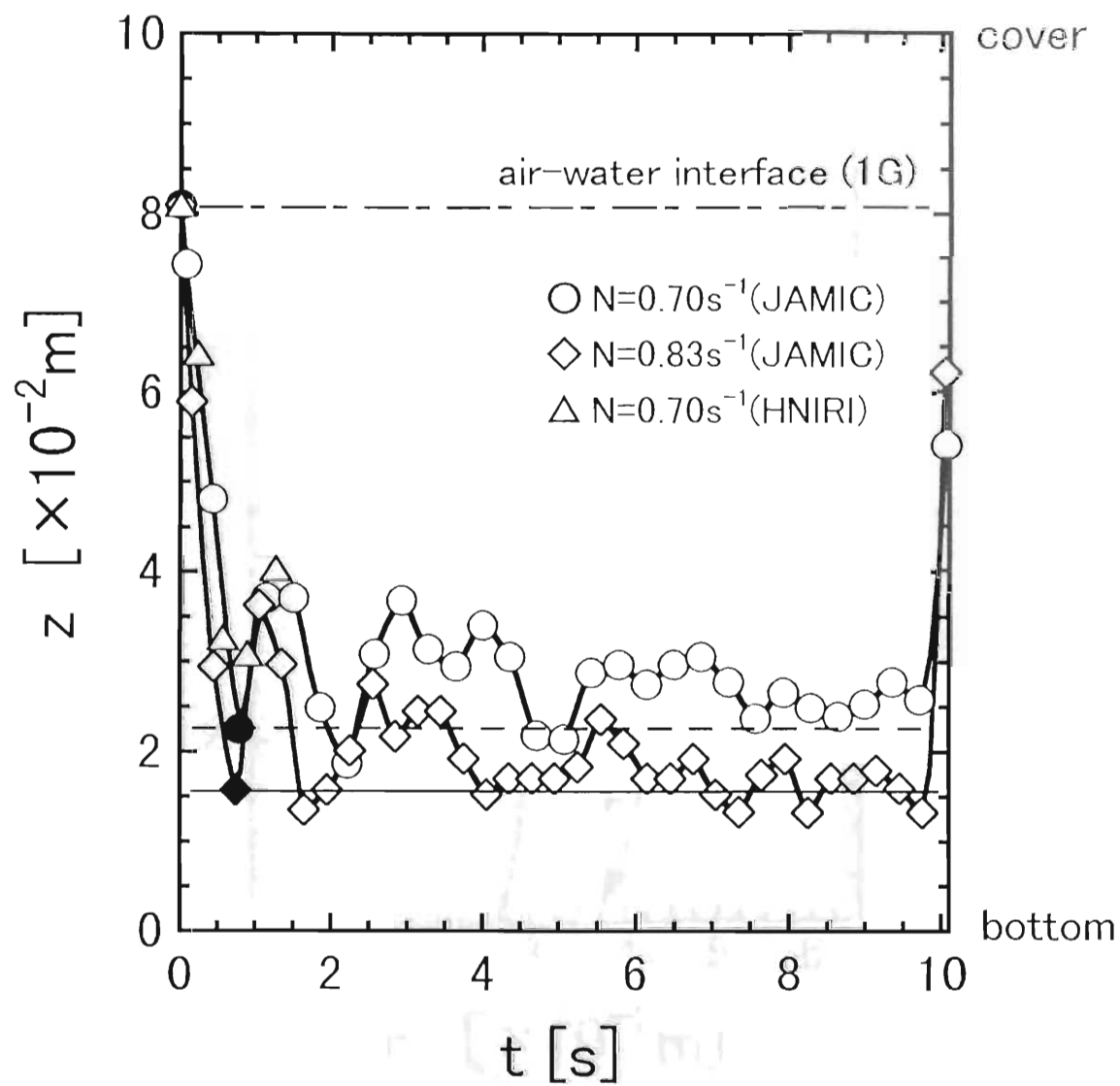


Fig.4-6 Minimum distance between interface and bottom as a function of time
 Shaft : SUS304, Bottom : PMMA, Cover : PMMA, $D_T=130mm$,
 $H=100mm$, $\varepsilon_{TL}=0.81$

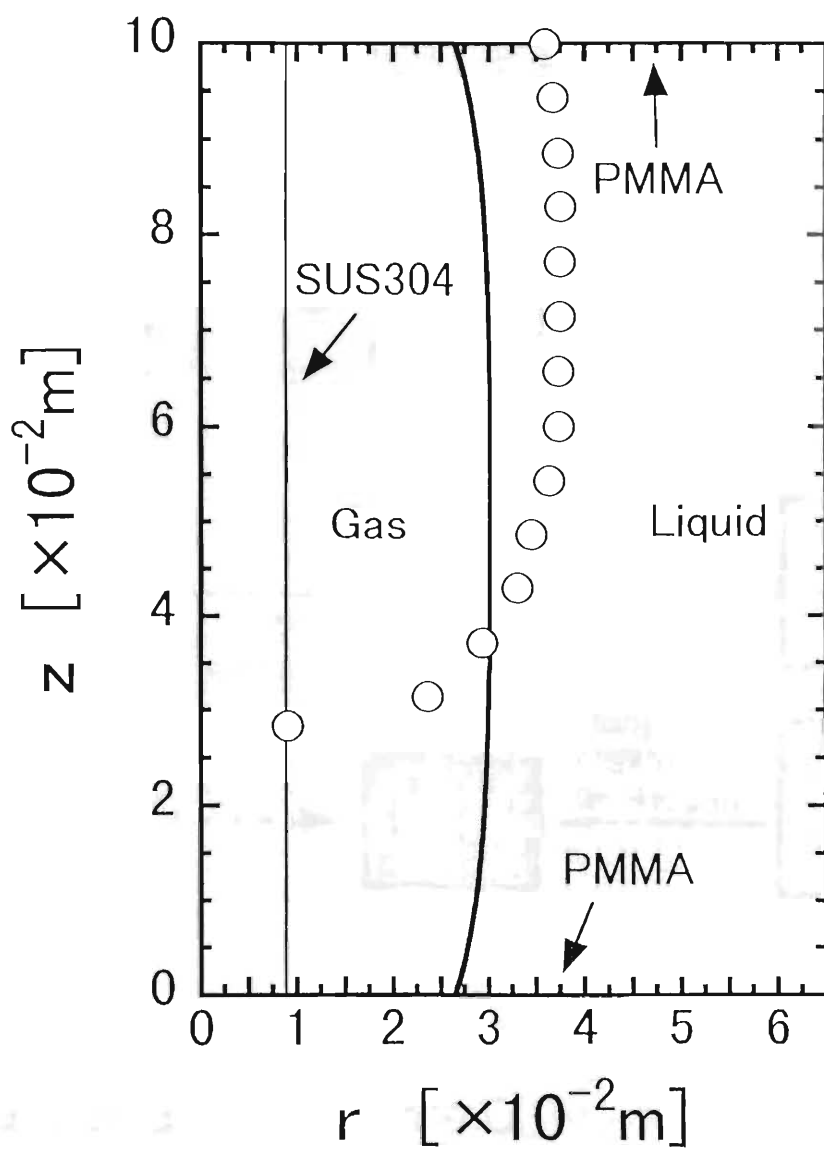


Fig.4-7 Air-water interface profiles

Shaft : SUS304, Bottom : PMMA, Cover : PMMA, $D_T=130\text{mm}$, $H=100\text{mm}$

— Eq.(1), $\theta = 72^\circ$ (PMMA-water)

○ $N=0.70\text{s}^{-1}$, $t=9.17\text{s}$, $\varepsilon_L=0.81$, JAMIC

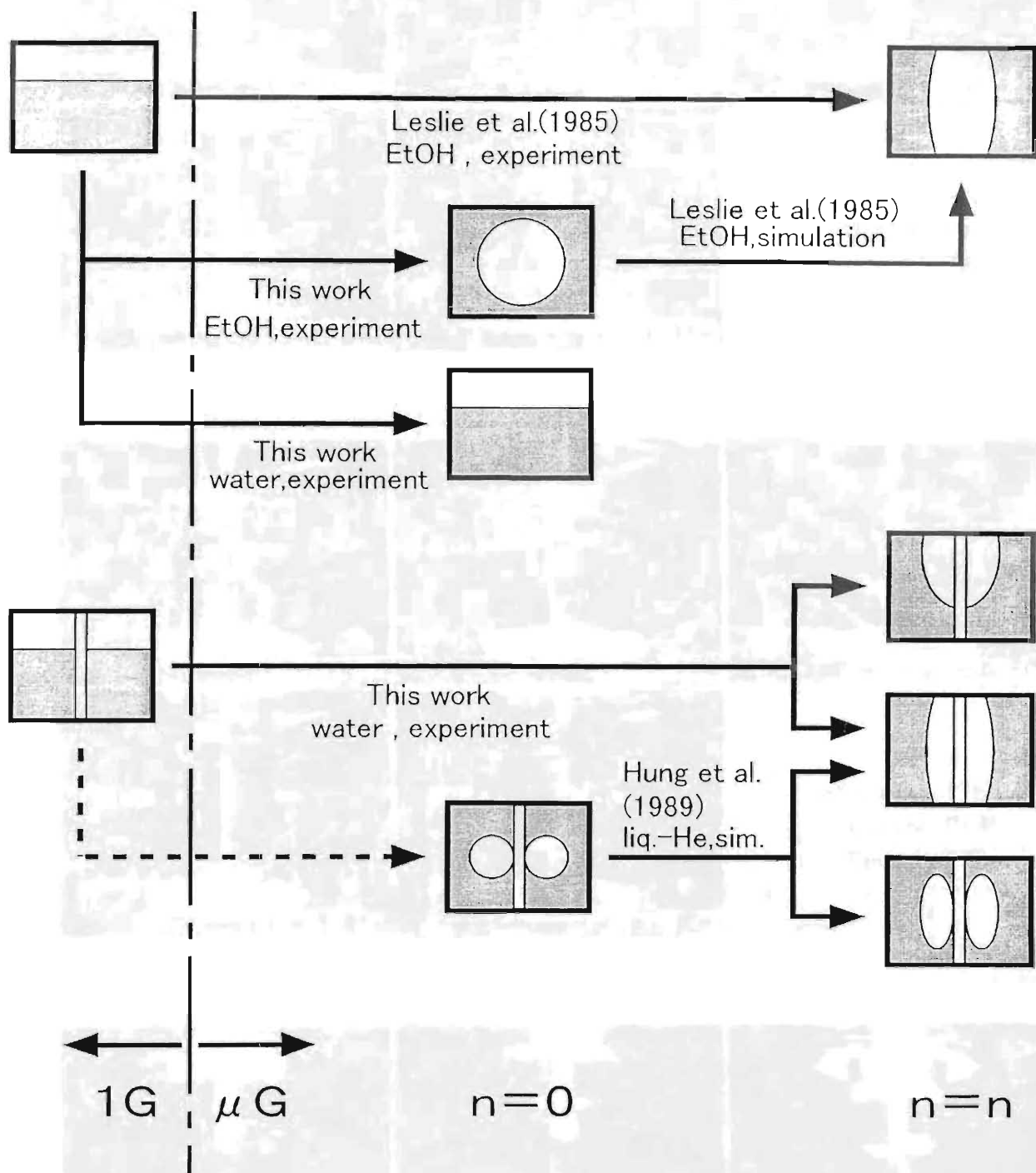
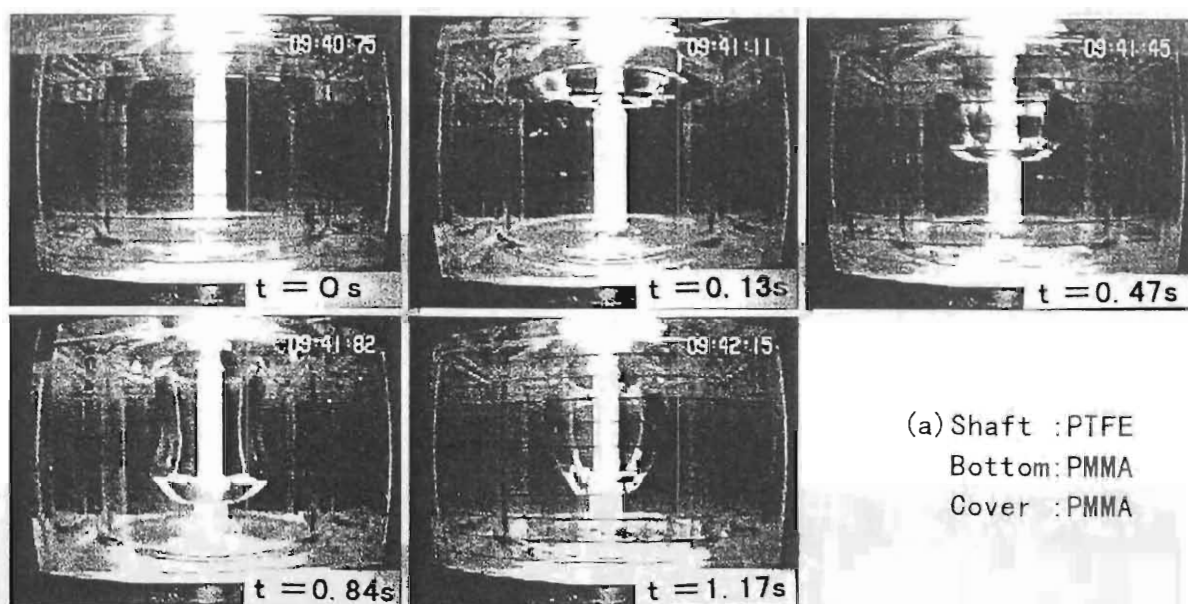
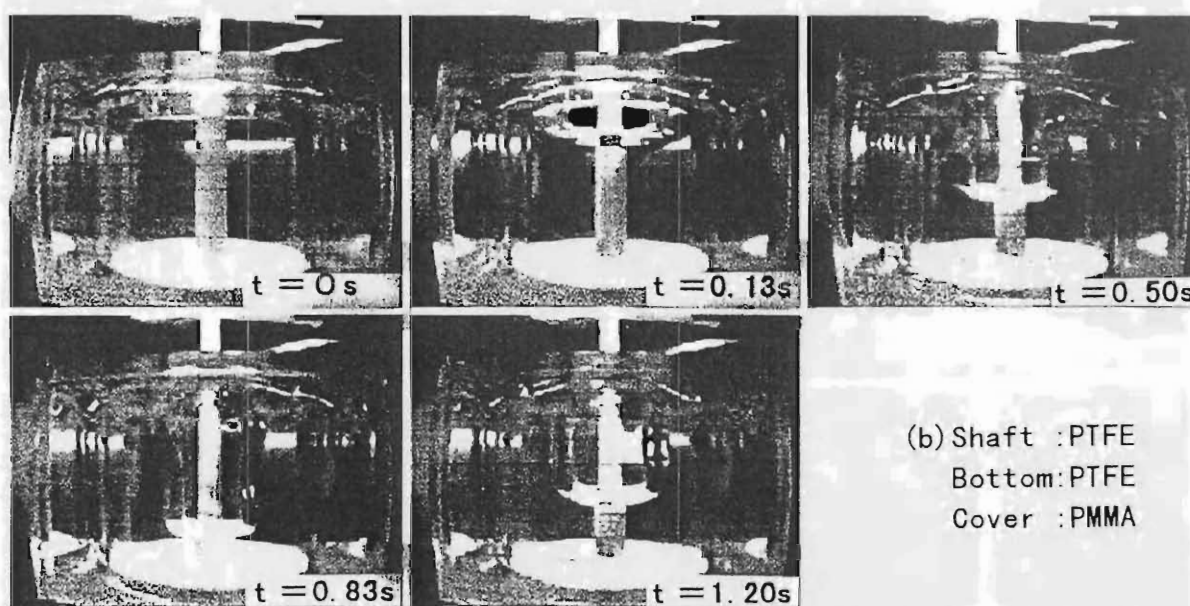


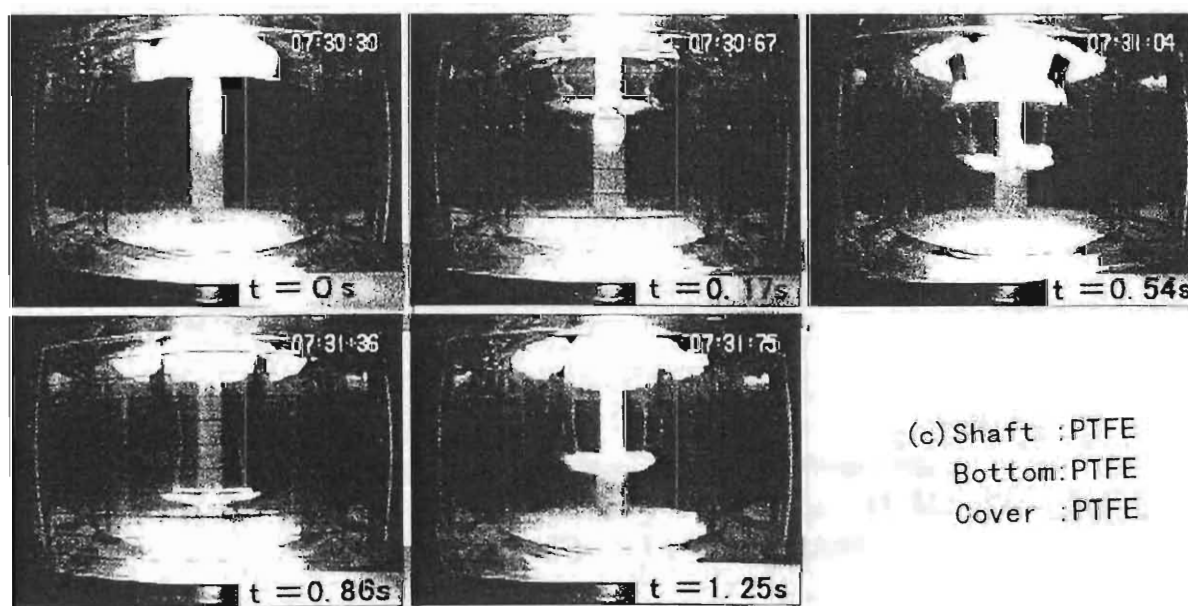
Fig.4-8 Experimental and simulated conditions



(a) Shaft : PTFE
Bottom: PMMA
Cover : PMMA



(b) Shaft : PTFE
Bottom: PTFE
Cover : PMMA



(c) Shaft : PTFE
Bottom: PTFE
Cover : PTFE

Fig.4-9 Air-water interface shape at various drop time
 $D_T=130\text{mm}$, $H=100\text{mm}$, $N=0.70\text{s}^{-1}$, $\varepsilon_L=0.81$, HNIRI

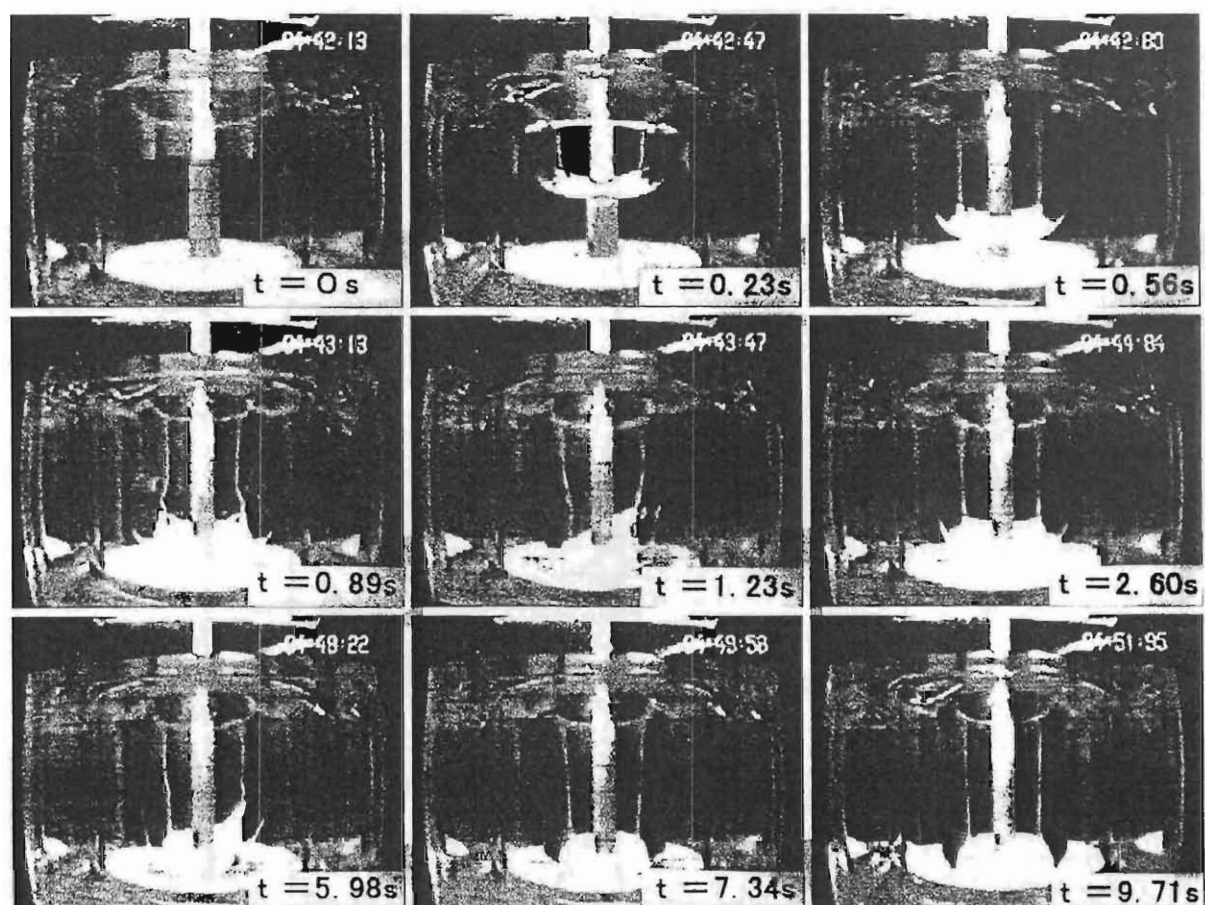


Fig.4-10 Air-water interface shape at various drop time
 Shaft : PTFE, Bottom : PTFE, Cover : PMMA, $D_T=130\text{mm}$,
 $H=100\text{mm}$, $N=0.70\text{s}^{-1}$, $\varepsilon_L=0.60$, JAMIC

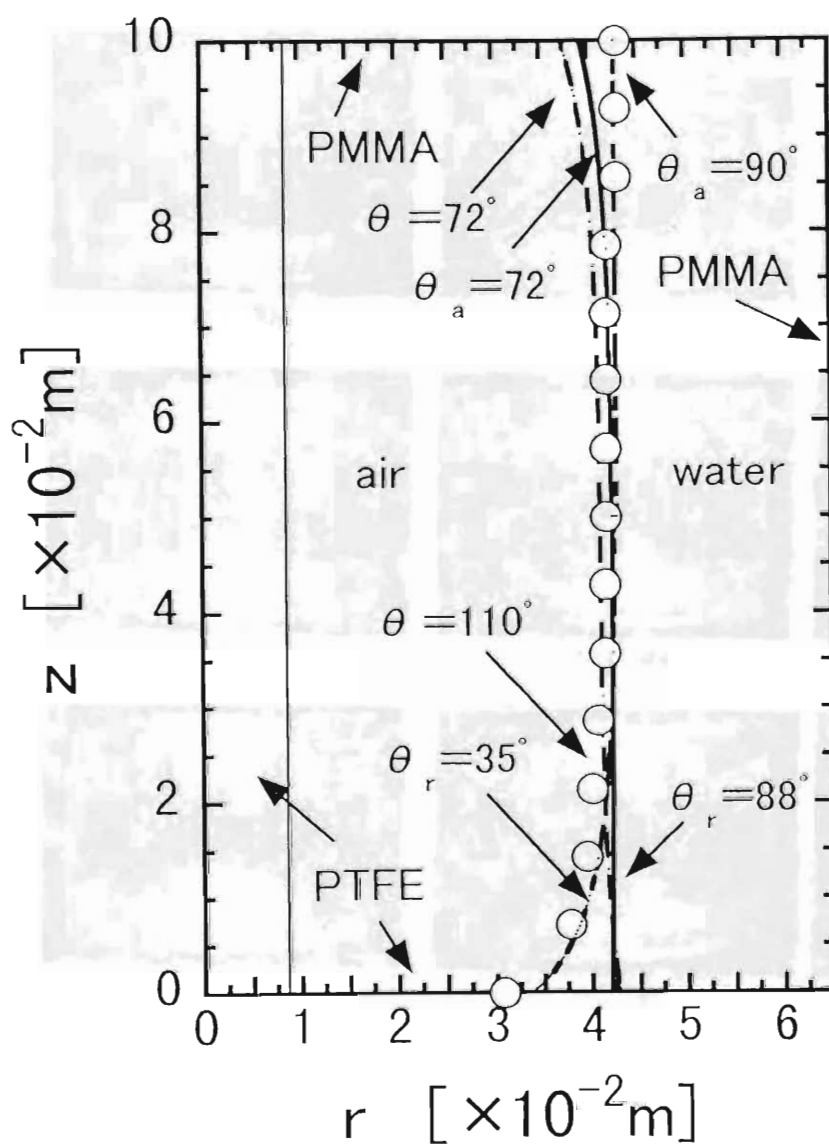


Fig.4-11 Air-water interface profiles
 Shaft : PTFE, Bottom : PTFE, Cover : PMMA
 $D_T = 130 \text{mm}$, $H = 100 \text{mm}$
 — $\theta = 72^\circ$ (PMMA-water), $\theta = 110^\circ$ (PTFE-water)
 - - - $\theta_a = 72^\circ$ (PMMA-water), $\theta_r = 88^\circ$ (PTFE-water)
 - - - $\theta_a = 90^\circ$ (assumed), $\theta_r = 35^\circ$ (assumed)
 ○ $N = 0.70 \text{s}^{-1}$, $t = 9.71 \text{s}$, $\varepsilon_L = 0.60$, JAMIC

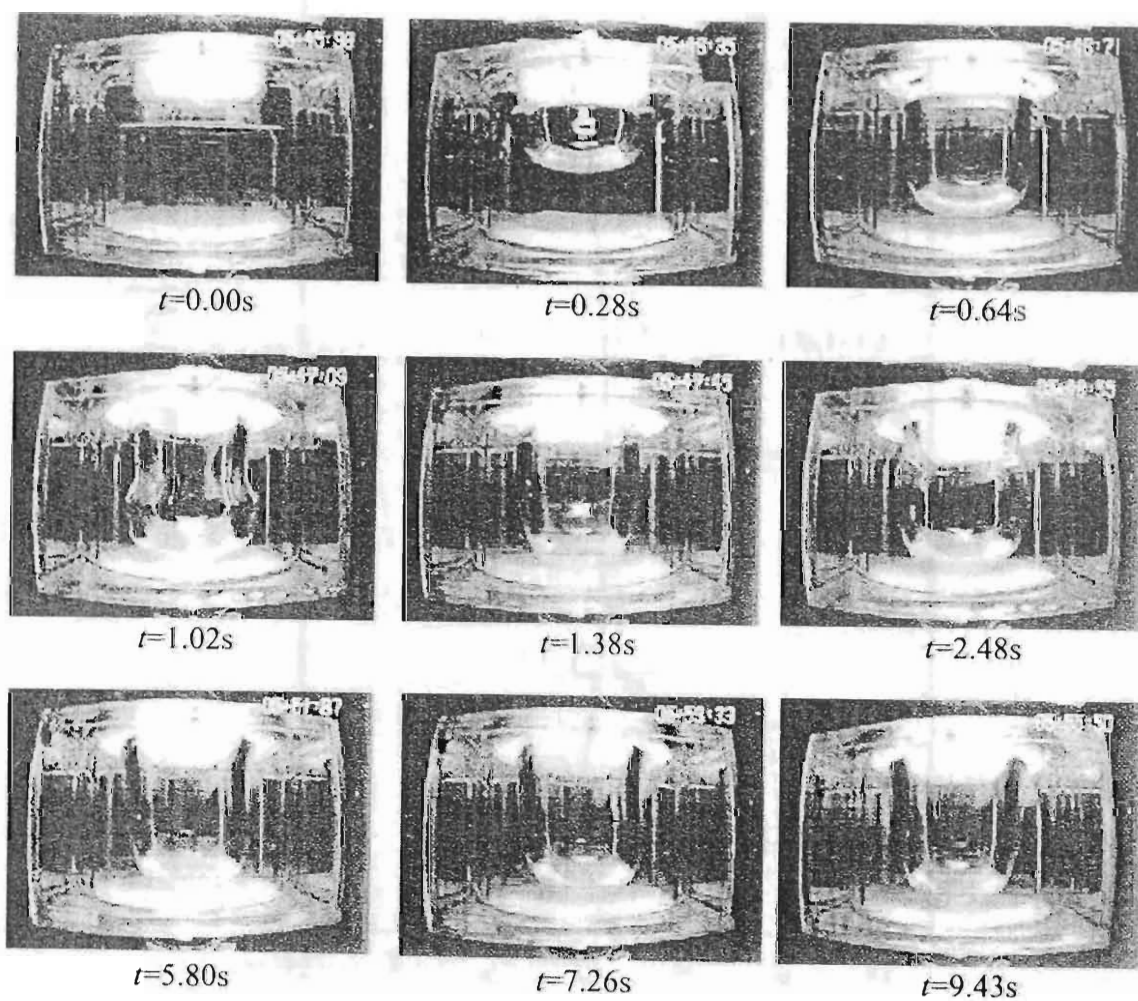


Fig.4-12 Air-water interface shape at various drop times (without shaft)

Bottom : PTFE, Cover : PTFE, $D_r=130mm$, $H=100mm$, $N=0.70s^{-1}$, $\epsilon_L=0.60$, JAMIC

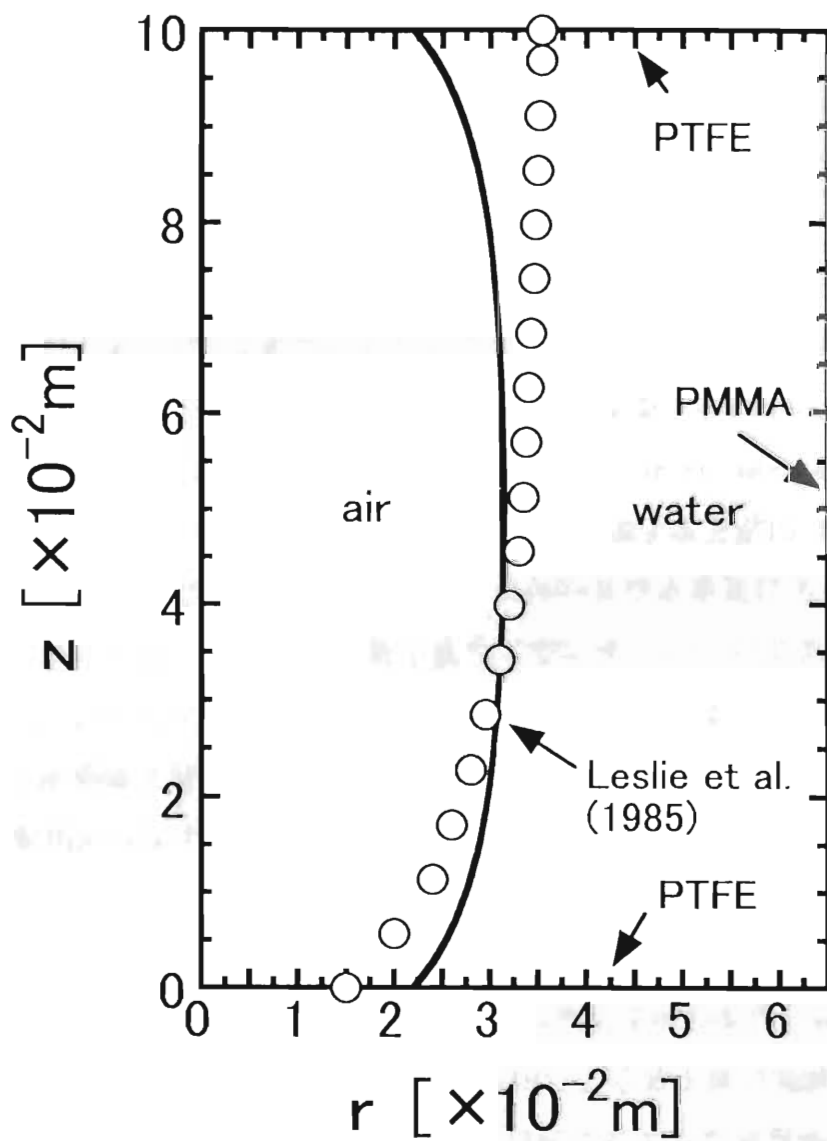


Fig.4-13 Air-water interface profiles

Bottom : PTFE, Cover : PTFE, $D_T=130\text{mm}$, $H=100\text{mm}$, $N=0.70\text{s}^{-1}$, $\epsilon_L=0.60$, JAMIC
 $\theta = 72^\circ$ (assumed)

○ $N=0.70\text{s}^{-1}$, $t=9.43\text{s}$, $\epsilon_L=0.60$, JAMIC

1.緒言

宇宙ステーションなどの閉鎖系微小重力環境では、人間活動によって生成した二酸化炭素を酸素に変換するシステムが必要である(Moriら,1989; Oguchiら,1987,1989)。変換を生物学的方法で行う場合、バイオリアクターを利用し、その際、液形状即ち気液界面の制御が重要となる。地上1Gにおいて、気液界面の制御と液相からの気泡除去は重力が作り出す浮力によって容易に行うことができる。しかしながら、微小重力下ではほとんど浮力が作用せず、液形状も不安定である。微小重力下においては、多くは重力の代わりとなる力(慣性力,遠心力など)を使用して気泡や液体形状を制御する方法が検討されている(Hungら,1989a,1989b; Imaiら,1994; Jayawardenaら,1997; Leslieら,1985)。Leslieら(1985)は宇宙空間で液体ヘリウムを貯蔵する方法について検討し、無重力下における回転容器内の液体ヘリウム-気体ヘリウム系及びエタノール-空気系の気液界面形状をシミュレートし、微小重力下でエタノール-空気系の気液界面形状を観察した。Leslieら(1985)の報告を要約すると微小重力下における液体ヘリウム貯蔵瓶に対する気液界面に適した特性は以下のようになる。

- (1)容器中央に気相が存在する。
- (2)液相は壁側に存在し、壁全体を濡らす。
- (3)容器の底面及び上蓋の中央に気固接触面がある。

Leslieら(1985)は導いた気液界面曲線の方程式が実数解を持つ条件、 $We^* > 0.5$ で上記(1)-(3)を満たすことをシミュレーション及び航空機による微小重力実験により見いだしている。微小重力下における液体ヘリウム貯蔵瓶に対する気液界面に適した上記(1)-(3)は藍藻スピルリナの培養にも適した気液界面特性と考えられる。しかし、Leslieら(1985)は藍藻スピルリナの培養に重要な水-空気系について実験的検討を行っていない。また、Hungら(1989a)は水-空気系についてシミュレーションを行い、系に遠心力を与えず容器材質と水の接触角がほぼ0と仮定した場合、残留重力レベルが 6×10^{-2} - 5×10^{-3} G程度であれば、水-空気系の気液界面は容器壁を上昇し、地上1Gに比べて大きく異なる気液界面形状になることを報告しているが、実験的検討は行っていない。

第4章で、我々は微小重力下におけるスピルリナ育成環境形成の可能性について実験的に検討した。我々がアクリル樹脂製容器内の水-空気系で容器を回転させずに、

残留重力レベル約 10^{-3} G以下の条件で行った微小重力実験の結果、気液界面は全く変形せず、Hungら(1989)のシミュレーション結果と気液界面形状が大きく異なった。ステンレス鋼軸を回転中心に貫通させたアクリル樹脂製円筒容器に水を入れ、容器ごと回転させることにより、落下塔で作り出した微小重力下にある回転容器内の水-空気系に容器壁基準で 10^{-1} G程度の低遠心力場を与えた。Leslieら(1985)のモデル式を用いたシミュレーション結果からは(1)-(3)の条件を満たすと予測される、液量率を0.81とした場合、我々の実験では気液界面が上蓋に到達するものの、容器底面に届かなかった。ステンレス鋼軸及び容器底面をテフロンで被覆して疎水性を高め、液量率0.60、容器回転速度 0.70s^{-1} で行った微小重力実験の場合、気液界面は、底面及び上蓋と接触することを見いだした。また、ステンレス鋼軸を取り除いた容器を用いた場合についても実験的検討を行い、気液界面が底面及び上蓋と接触した。これら2つの容器を使用した場合、どちらも水は容器側壁に沿って上昇し、側壁全面を濡らした。このようにして、約 10^{-1} Gの低遠心力を用いることにより、我々は微小重力下におけるスピルリナ育成環境に適した条件を確立できることを実証した。

第5章では、微小重力下において中空回転液層が形成できる条件を系統的に検討するため、容器内の軸を取り除いた容器を用いて微小重力実験を行った。実験結果から、形成可否の条件をまとめて表すマップを作成した。

2. 実験装置及び方法

地下落下塔型微小重力実験施設として、(株)地下無重力実験センターを利用して実験を行った。また、容易に使用できる北海道工業技術研究所の落下施設を利用して微小重力実験を行った。

Fig.5-1に微小重力実験に使用した装置の概略図を示す。装置は動力源、制御部、回転容器、記録部から構成される。容器以外は第4章と同様であり、以下簡単に述べる。回転容器としてアクリル樹脂製円筒容器を用い、容器内径は55-200mm、容器高さと同容器内径の比である容器縦横比は0.10-0.80の範囲で変化させた。実験条件をTable5-1にまとめて示す。容器回転速度は $0.0-1.7\text{s}^{-1}$ 、液量率は0.10-0.95の範囲でそれぞれ変化させた。液体としてイオン交換水、水飴水溶液、 $5\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ドデシル硫酸ナトリウム水溶液を用いた。本研究で使用した液体の物性をTable5-2に示す。密度、粘度、表面張力は比重計、オストワルド粘度計、Du Nouy表面張力計を用いて測定した。

JAMIC落下実験では、室温放置した所定量の水を回転容器に入れ、ポータブル交流電源の電源を入れた状態で落下カプセルに搭載した。地上における予備実験の結果、液量率により異なるが容器回転速度と液回転速度が一致するまで、即ち液が固体的回転を開始するまで概ね4-5分を要したことから、落下6分前にJAMIC制御盤からプログラマブルコントローラに信号を送り、装置に搭載しているモータ、照明、8ミリビデオカメラの電源を入れた。プログラマブルコントローラは、信号受信から7分後、即ち落下1分後に全電源が切れるようにプログラムした。HNIRIにおける微小重力実験の場合、JAMICの信号と等価の短絡信号を送り、信号送信から6分後にカプセルを落下させ、微小重力実験を行った。その他の操作は全てJAMICと同様である。

3. 結果と考察

3.1 中空回転液層形成の判定基準

Fig.5-2に容器回転速度 1.2s^{-1} 、液量率0.60としてJAMICで行った水-空気系の微小重力実験の結果を示す。落下直後から空気は容器中央を降下し、約0.5秒後に底面に接触した。同時に水は側壁を登り、0.33秒後に上蓋に達した。約2秒後、気液界面はLeslieら(1985)のモデル式から予測される形状に類似した形状に変形し、落下終了まで安定していることがわかった。すなわち、水-空気系で中空回転液層が形成されることがわかった。Fig.5-3に容器回転速度 0.50s^{-1} 、液量率0.60としてJAMICで行った水-空気系の微小重力実験結果を示す。落下直後、水-空気系界面は湾曲したが、落下終了まで気相は底面に届かず、水も上蓋に接しなかった。落下約5秒後、気液界面はほとんど静止したため定常状態に達したと見なした。

JAMICで行った微小重力実験の結果から、定常状態の気液流動状態を観察し、中空回転液層の形成を判定した。

判定基準1: 気液界面と底面が接触する

判定基準2: 液体と上蓋が接触する

判定基準1,2を同時に満たす気液界面形状が観察された場合、形成は可能と判定した。また、判定基準1または2のどちらか一方でも満たさない気液界面形状が観察された場合、中空回転液層の形成は不可能と判定した。

Fig.5-4にJAMICで行った微小重力実験の結果から得た気液界面と底面の最短距離の経時変化を示す(白key)。小さいkeyは読みとり面以外の映像から読みとった参考デ

ータである。容器回転速度 1.2s^{-1} の場合、気液界面が底面に接触し、落下終了まで維持されたが、容器回転速度 0.50s^{-1} の場合、一旦気液界面が底面に近づき、気液界面との距離が1回目の極小となった後、気液界面は上昇した。2回目の極小値は1回目の極小値よりも大きい値となった。その後気液界面と容器底面の距離は減衰振動し、約5秒以降に一定値となった。

JAMIC落下塔は使用回数が限られるため、全ての微小重力実験をJAMICで実施することができない。そこで、HNIRIの落下塔も利用した。しかし、残留重力レベル、落下時間が異なるため、JAMICと同様の実験が行えるか検討した。JAMIC落下実験と同条件で行ったHNIRI落下実験の結果から得た気液界面と底面の最短距離の経時変化をFig.5-5に示す(黒key)。気液界面と底面の最短距離の経時変化は両落下実験とも殆ど同じである。また、気液界面の変形過程にも殆ど差異は観察されなかった。従って、落下1.4秒まではJAMICとHNIRIの実験結果は同じとして処理できる。

HNIRIにおける1.4秒間の微小重力実験では気液界面形状が定常状態になるまで観察できない。そこで、Fig.7に示すように気液界面と底面間距離の1,2回目の極小値から定常状態の推定を行った。1回目の極小値が0にならない場合、中空回転液層の形成は不可能と判定した(黒key)。一方、1回目の極小値が0を維持した場合、中空回転液層の形成は可能と判定した(白key)。しかし、1回目の極小値が0になるものの、その後気液界面が底面から離れる実験条件も存在する。このような実験条件は2回目の極小値から定常状態の推定を行った。2回目の極小値が0にならない場合、中空回転液層の形成は不可能と判定した(黒key)。一方、2回目の極小値が0になる場合もあるが、落下時間が短いためその後の変化を観察することができない。定常状態を推定することができないため、これらの条件は、中空回転液層の形成は不明と判定した(○key)。

3.2 中空回転液層の形成に及ぼす液物性の影響

(1) 無次元数の選定

Leslieら(1985)はWeber数の代表長さとして気相最大半径 R を用いているが、最大気相半径 R は容易に算出できないこと、中空回転液層の形成が不可能な条件については We^* を計算できない。

$$We^* = \frac{(\rho_l - \rho_g)n^2 R^3}{8\sigma} \quad (5-1)$$

本実験で回転容器内の液体挙動を観察すると、落下と同時に液が容器壁を上昇する。

中空回転液層の形成には容器壁での遠心力が重要な因子であると推測される。そこで、代表長さとして回転容器内径 D を用いたWeber数 We を考えた。

$$We = \frac{\rho \omega^2 D^3}{\sigma} \quad (5-2)$$

しかし、この定義ではLeslieら(1985)の式と異なる意味を持つ。そこで、容器中心に形成されるガス相が円柱になると仮定した際の円柱径 d を代表長さとした修正Weber数 We' を考案した。

$$We' = \frac{\rho \omega^2 d^3}{\sigma} = We(1 - \epsilon)^{3/2} \quad (5-3)$$

この定義ではLeslieら(1985)の式と類似した意味を持ち、かつ前述した容器壁基準のWeber数 We の意味も含む。そこで、以降この修正Weber数 We' を使用することとした(Fig.5-6)。Reynolds数についても、代表径として d を用いた修正Reynolds数 Re' を使用した。

(2) 液物性の影響

中空回転液層の形成に及ぼす粘度 μ 及び容器回転速度 n の影響を水及び水飴水溶液を用いた液量率0.60の実験結果より検討し、修正Weber数 We' と修正Reynolds数 Re' の関係としてFig.5-7に示す。Fig.5-7中の白keyと黒keyは判定1,2を共に満たす実験条件、判定1または2を満たさない条件を示す。中空回転液層形成の可否は後述する式から算出した $We' = 2.2$ を示す破線で明確に分けられ、中空回転液層の形成は修正Reynolds数 Re' に依存しないことがわかった。

上記実験では、Weber数の分子にある容器回転速度、液密度が変化しているが、分母にある表面張力を変化させていない。容器回転速度、液密度からは他にも多くの無次元数が作られるため、中空回転液層の形成可否を区分する無次元数としてWeber数(We, We^*, We')が妥当であるか確認する必要がある。Weber数の妥当性を確認するため、容器回転速度 0.60 s^{-1} 、液量率0.60で表面張力の影響について実験的に検討した。Fig.5-8(a)に水-空気系($\sigma = 73 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$)、(b)にドデシル硫酸ナトリウム水溶液-空気系($\sigma = 36 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$)の気液界面形状を示す。Fig.5-8(a)に示したように、水-空気系の界面形状は底面に接触せず、水は上蓋に届かなかった。この場合の修正Weber数 We' は1.2であり、中空回転液層形成は不可能な領域になる。一方、表面張力が水の半分であるドデシル硫酸ナトリウム水溶液-空気系の場合、気液界面形状(Fig.5-8(b))は判定基準1,2を

満たすことから、中空回転液層形成が可能であると判定される。Fig.5-7に結果を□で示す。この場合の修正Weber数 We^+ は2.5であり、 $We^+=2.2$ を境界として表面張力の大小により中空回転液層形成の可否が分かれ、Weber数が中空回転液層の形成可否を区分する無次元数として妥当であることが確認できた。

次に液量率を変化させた実験を行い、修正Weber数 We^+ と液量率 ϵ_L の関係をFig.5-9に示す。Fig.5-7同様、は中空回転液層形成が可能、形成不可能な実験条件を白key,黒keyで示す。HNIRIで行った1.4秒間の微小重力実験で定常状態が推定できなかった条件は○等のkeyで示した。Leslieら(1985)のモデル式において実数解を持つ条件($We^* \geq 0.5$)が我々の判定基準を満たす条件であり、スピルリナ育成環境として適している。従ってLeslieら(1985)の計算線を用いると、 $We^*=0.5$ を境界として中空回転液層の形成可否が判定できる。各液量率 ϵ_L ごとに $We^*=0.5$ となる修正Weber数 We^+ を計算し、図中に破線で示した。破線左部はLeslieら(1985)の式から中空回転液層の形成が可能($We^* > 0.5$)と判定される領域であり、破線右部は形成不可能($We^* < 0.5$)と判定される領域である。本実験結果では、Leslieら(1985)の結果と同様に破線右部に中空回転液層形成が不可能と判定される。しかし本実験の結果、破線左部に中空回転液層形成が可能と判定された実験条件と形成不可能と判定された実験条件が混在している。これより、Leslieら(1985)のモデル式から得られる可否境界線のみでは本実験で用いたアクリル樹脂製容器内の水-空気系の実験結果を説明できない。本実験で得られた形成可否を表すプロットは1つの直線で明確に分けられ、直線左側は形成不可、直線右側は形成可能となった。この直線は、

$$We^+ = 79.4 \exp(-6.0 \epsilon_L) \quad (5-4)$$

で表される。Eq.(5-4)の物理的意味は現時点で不明であるが、初期状態、容器材料との接触角、液形状の変形に伴う濡れ仕事、表面エネルギーなどが関与していると考えられる。Fig.5-9中に実線で示した境界線はEq.(5-4)を再プロットしたものである。中空回転液層の形成可否はLeslieら(1985)のモデル式から得られる境界線とEq.(5-4)を組み合わせることによって明確に分けられる。即ち、同図は微小重力下における中空回転液層の形成可否が修正Weber数 We^+ と液量率 ϵ_L によって決定できることを示している。

3.3 中空回転液層形成に及ぼす容器形状の影響

(1) 容器規模の影響

Fig.5-10に容器縦横比を0.65、液量率を0.60で一定とした場合の容器内径 D と修正Weber数 We^+ の関係を示す。白抜きのkeyは中空回転液層が形成された条件、黒塗りのkeyは中空回転液層が形成されなかった条件である。また、JAMICで行った実験条件は大きいkeyで示した。HNIRIを使用した実験では微小重力時間の不足により定常状態における中空回転液層の形成可否を判定できない条件が存在した。HNIRIにおける遷移状態の結果から中空回転液層の形成可否を判定するため、Fig.5-5に示した推定方法を用いた。この判定方法を用いても定常状態が推定できなかったHNIRIの実験条件はなどのkeyで示した。同図中には容器内径100mm、水-空気系の場合のデータも示した。容器回転速度 0.70s^{-1} の場合、内径55-100mmの容器では中空回転液層が形成されなかったが、内径200mmの容器では中空回転液層が形成された。これは、容器規模の変化に伴う修正Weber数の増加によるものである。HNIRIで容器内径200mmの容器を用いて微小重力実験を行った場合、微小重力時間が短いために形成可否判定ができず、境界が明確にわからなかった。JAMICで容器回転速度 0.30s^{-1} の実験($We^+=2.5$)を行ったところ、中空回転液層が形成された。これより $We^+=2.2$ を境に形成可否領域を分割できることが確認された。

(2) 容器縦横比の影響

次に内径55-130mmの容器を用い、中空回転液層の形成に及ぼす容器縦横比の影響を検討した。液量率を0.60で一定とした場合の中空回転液層の形成可否判定図をFig.5-11に示す。1つの分割線で中空回転液層の形成可能領域と不可能領域に分けることができ、この中空回転液層の形成可否を分ける分割線は次式で表すことができた。

$$We^+=3.68(H/D)^{1.23} \quad (5-5)$$

3.4 中空回転液層形成マップ

これまでに行った全実験条件の形成可否を判定するための相関式の作成を試みる。Eq.(5-4)より分割線の We^+ は $\exp(-6.0 \varepsilon_1)$ に、Eq.(5-5)より $(H/D)^{1.23}$ に比例することから、縦軸を $We^+/(H/D)^{1.23}$ 、横軸を液量率とした中空回転液層の形成マップをFig.5-12に示す。これまでにおこなった全実験条件の形成可否をプロットすると、形成可否を分ける1つの分割線が得られた。

$$We^+=135(H/D)^{1.23}\exp(-6.0 \varepsilon_1) \quad (5-6)$$

Eq.(5-6)によりこれまでに行った全微小重力実験条件の中空回転液層の形成判定ができた。

結論

JAMIC及びHNIRI落下塔で作り出した微小重力下で中空回転液層の形成に及ぼす容器回転速度、液体積、液粘度、表面張力、容器内径、容器縦横比の影響を実験的に検討し、以下のことがわかった。

- (1) 中空回転液層形成の可否に及ぼす修正Reynolds数の影響は見られなかった。
- (2) 液量率0.60の場合、修正Weber数が2.2を越えると中空回転液層形成は可能であることがわかった。
- (3) 水を用いて形成不可能であった条件で表面張力が水の約半分である $5\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ドデシル硫酸ナトリウム水溶液を使用したところ、中空回転液層の形成が可能であった。従って、形成可否判定にWeber数を使用することの妥当性が確認された。
- (4) Leslieらのモデル式から形成可能と予測された実験条件の中に中空回転液層の形成が不可能な実験条件が存在し、Leslieら(1985)のモデル式はアクリル樹脂製容器内の水-空気系に対して適用できないことがわかった。
- (5) 実験結果を基に中空回転液層形成の可否を判定するための基準を作成した。仮想気相直径 d を代表長さとして用いた修正Weber数 We^* を用いることにより、本実験系における中空回転液層形成の可能、不可能を明確に分ける境界線Eq.(5-4)が得られた。この境界線とLeslieら(1985)のモデル式から得られる境界線を組み合わせることにより、アクリル樹脂製容器内の水-空気系に対して中空回転液層の形成可否判定を行うことができる。
- (6) 中空回転液層の形成に及ぼす容器規模の影響は見られず、容器縦横比が一定であれば同じ境界線により形成可否を区分することができる。
- (7) 液量率を0.60で一定として、容器縦横比を変化させた場合、微小重力下における中空回転液層の形成可否を表す分割線としてEq.(5-5)を得た。
- (8) これまでに得られた全データについて中空回転液層の形成可否を表す分割線としてEq.(5-6)を得た。

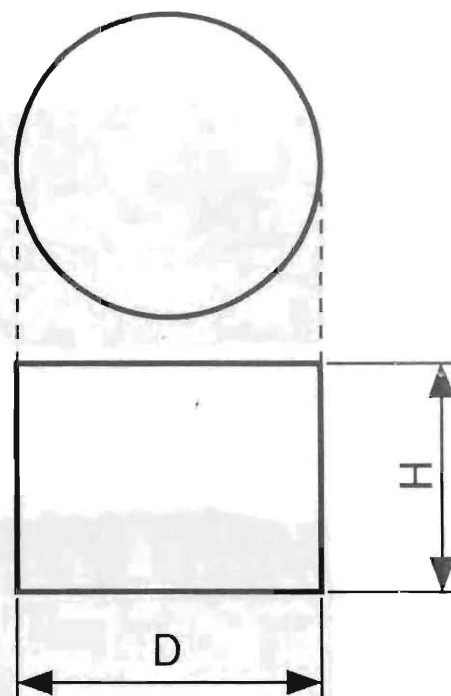
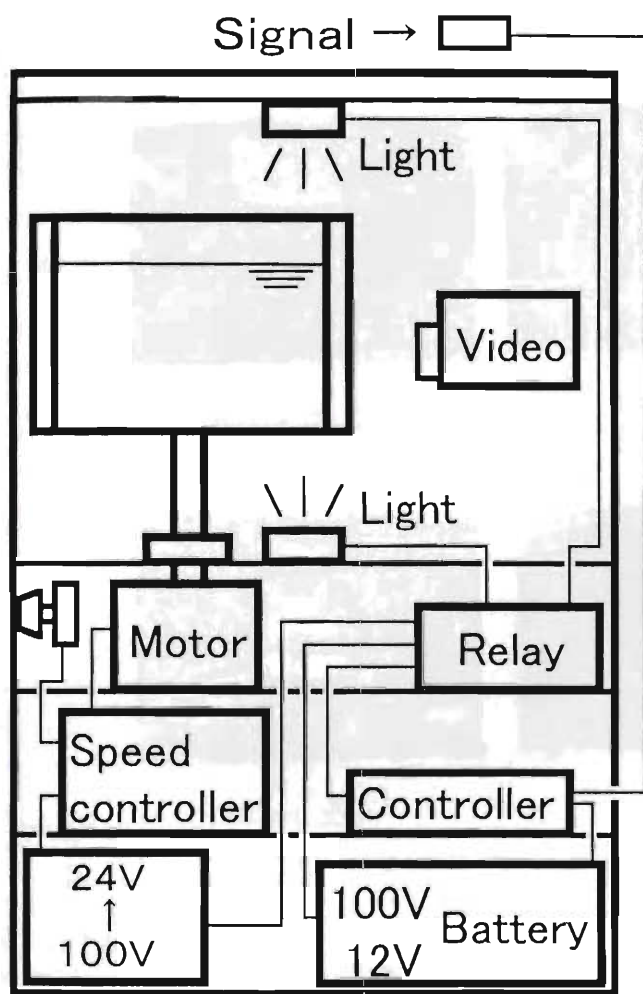
Table 5-1 Summary of experimental conditions

Rotating speed of vessel	$0.0 - 1.7\text{s}^{-1}$
Volume ratio of liquid/vessel	0.10 - 0.95
Vessel diameter	0.055-0.20m
Aspect ratio of height/diameter	0.10-0.80
Liquids	Ion-exchanged water Starch syrup solution $5\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ SDS solution
Temperature in capsule	293-300K
Liquid temperature	293-295K

Table 5-2 Liquid properties used in this study

Liquid	Density [kg·m ⁻³]	Viscosity [mPa·s]	Surface tension [mN·m ⁻¹]
Ion-exchanged water	1.00x10 ³	1.2	73
Starch syrup solution	1.06-1.24x10 ³	1.5-26.4	73
5kg·m ⁻³ SDS* solution	1.00x10 ³	1.2	36

SDS = sodium dodecyl sulfate



$$D=0.055-0.20\text{m}$$

$$H/D=0.10-0.80$$

Fig.5-1 Schematic diagrams of the experimental setup.

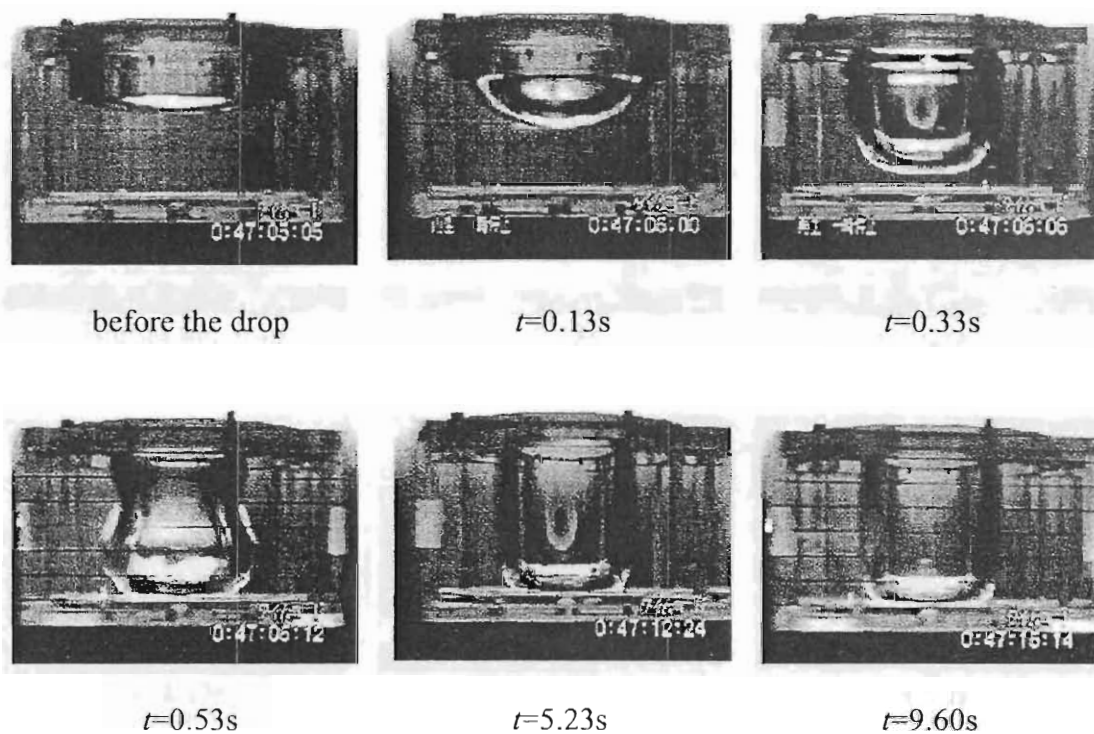


Fig.5-2 Air-water interface shape at various drop times.

$n=1.2s^{-1}$, $\epsilon_1=0.60$, $D=0.10m$, $H=0.065m$

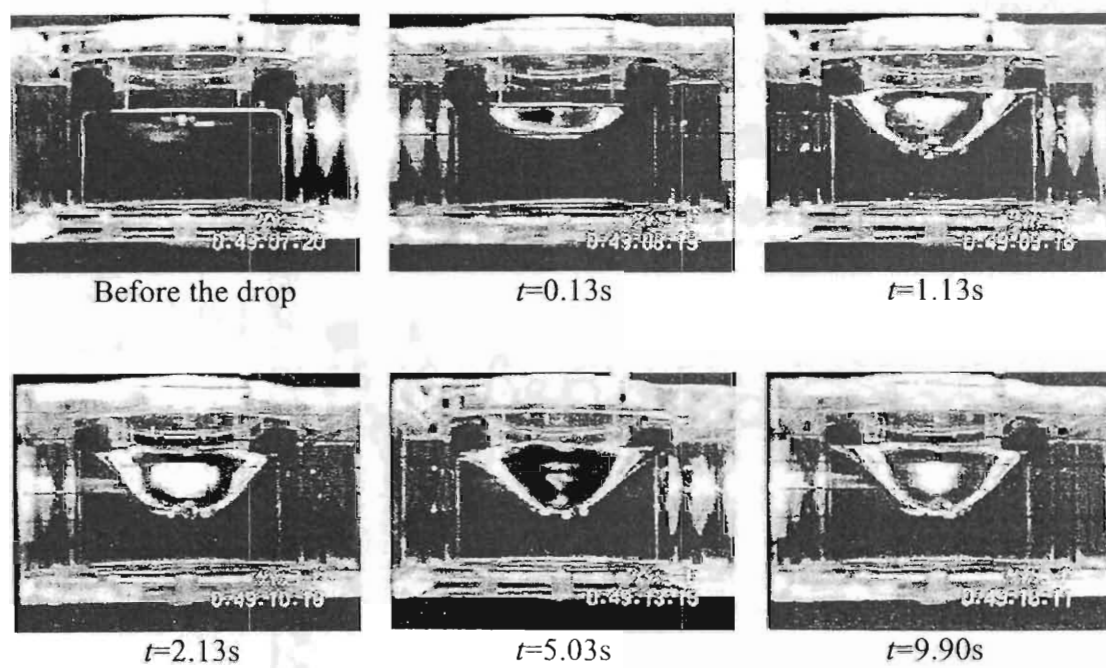


Fig.5-3 Air-water interface **shape at various** drop times.

$n=0.50s^{-1}$, $\varepsilon_1=0.60$, $D=0.10m$, $H=0.065m$

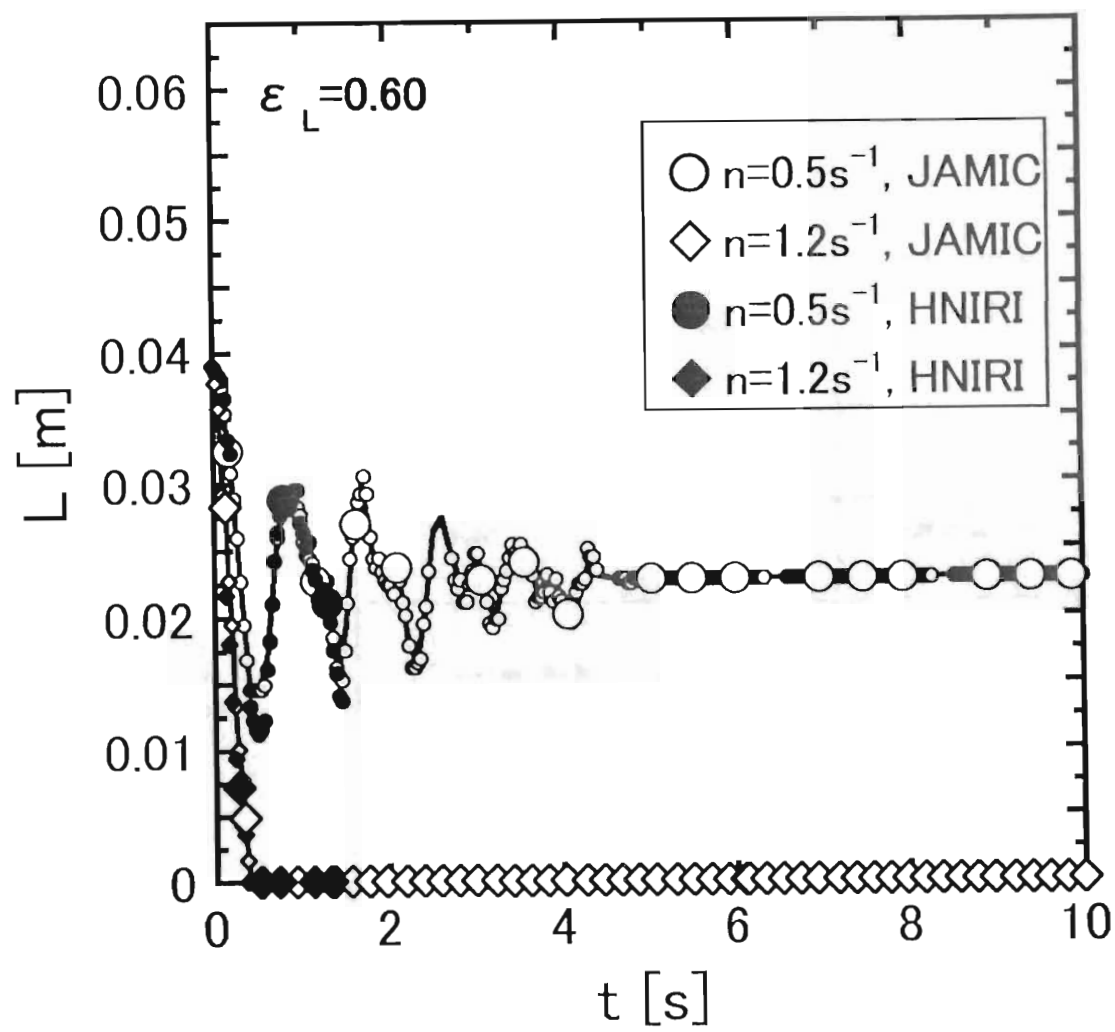


Fig.5-4 Minimum distance between the interface and the bottom as a function of time.

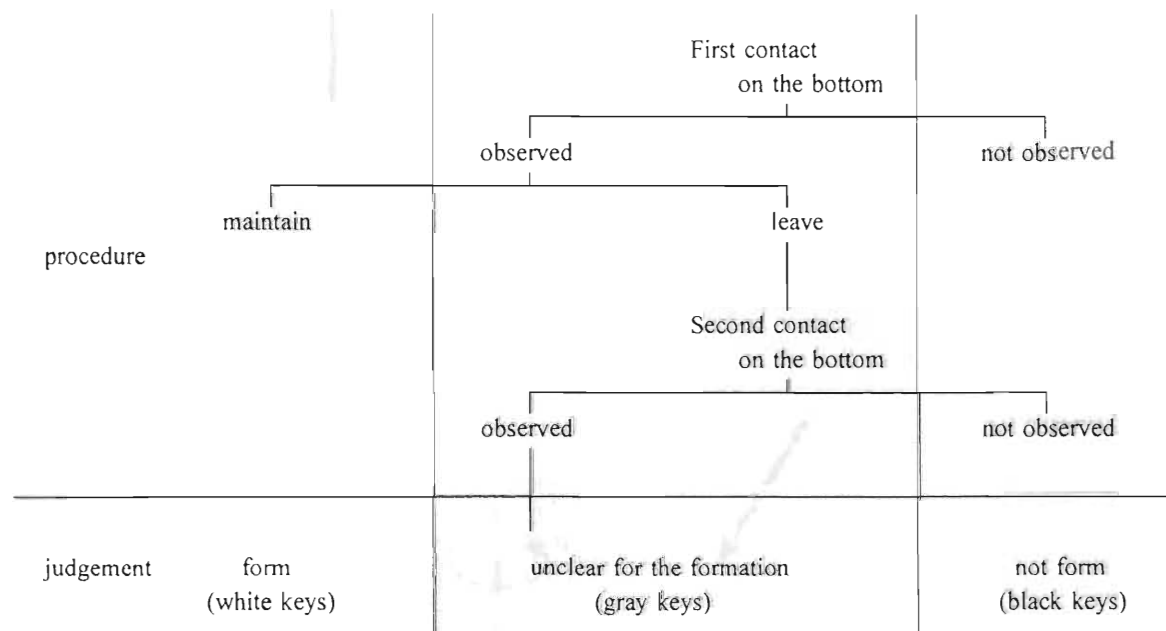


Fig.5-5 Estimating procedure of the formation of the air-liquid hollow profile at the HNIRI experiments.

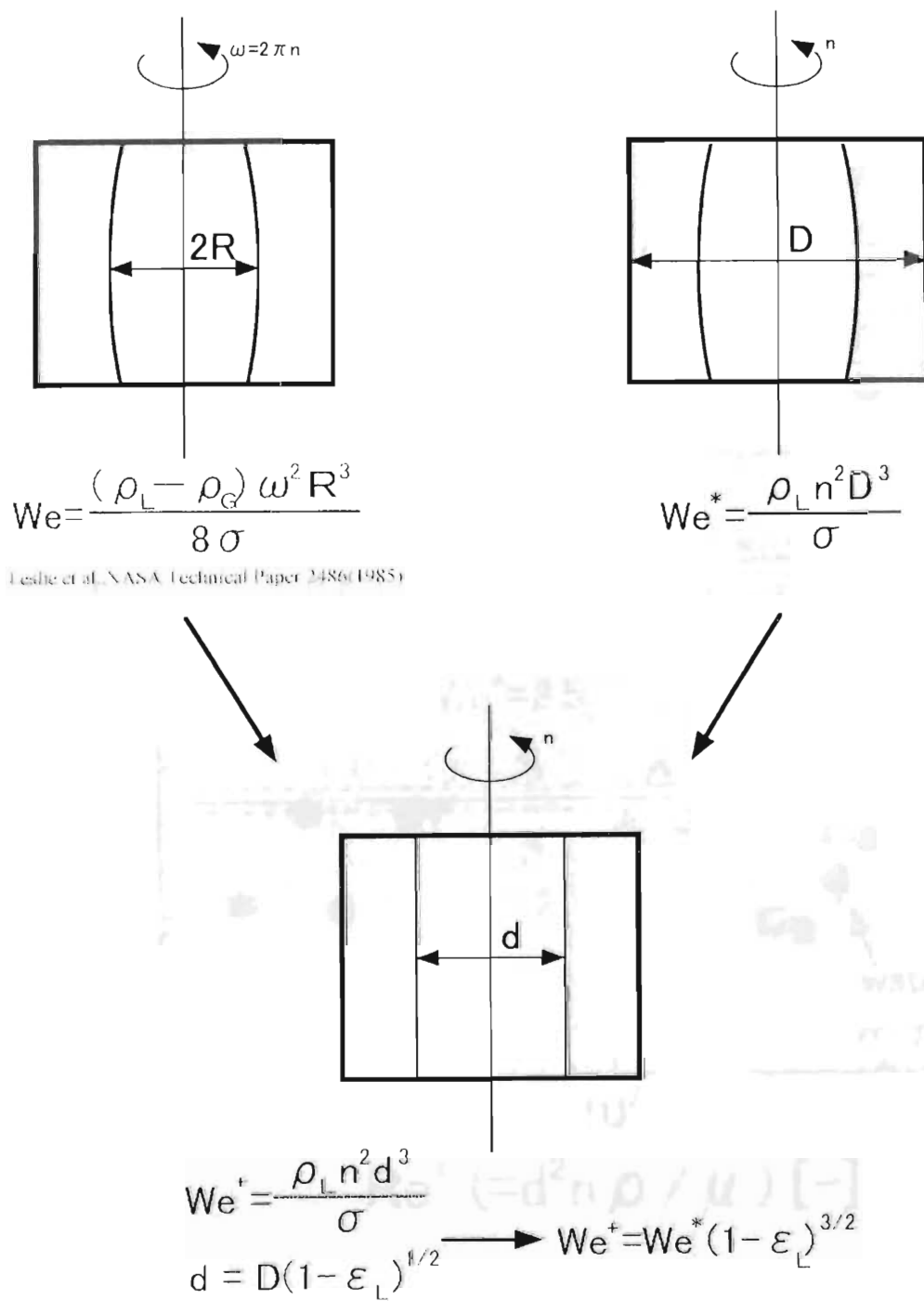


Fig.5-6 Weber numbers

Viscosity [mPa·s]	form.	non-form.
1.2	○	●
1.5	□	■
3.5	◇	◆
4.8	△	▲
13.4	▽	▼
15.5	◊	◈
26.4	⬡	⬢

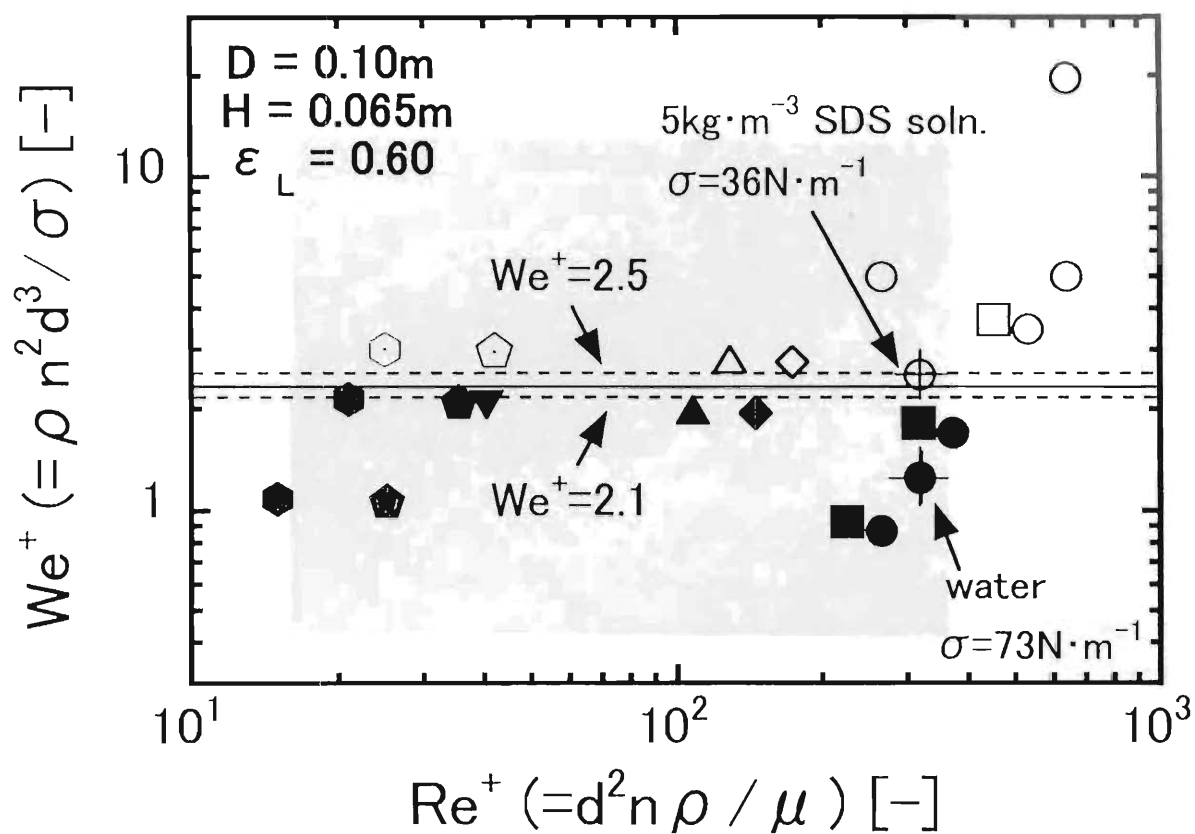
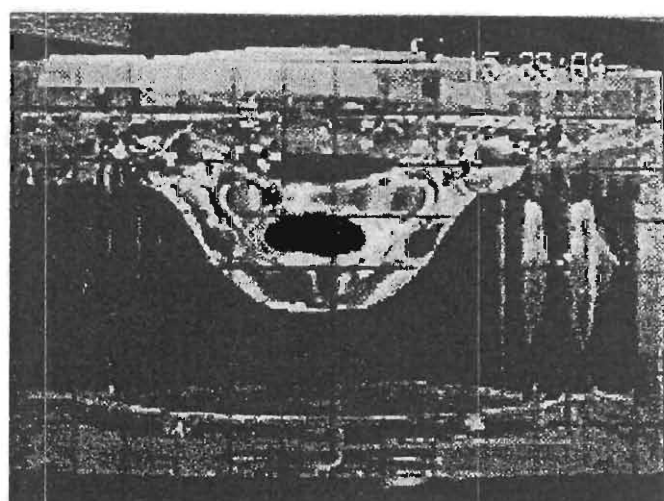
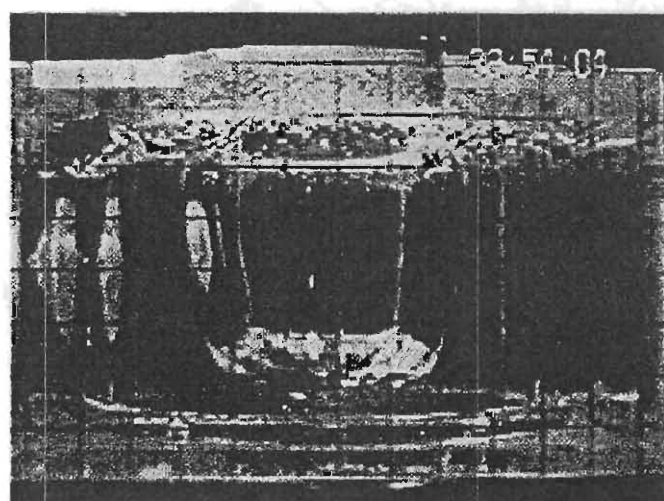


Fig.5-7 Effects of the Reynolds number and the Weber number on the formation of the air-liquid hollow profile.



(a) air-water, $\sigma=73\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$, $t=1.28\text{s}$



(b) air-SDS soln., $\sigma=36\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$, $t=1.31\text{s}$

Fig.5-8 Effect of the surface tension on the air-liquid interface shapes.

$n=0.60\text{s}^{-1}$, $\varepsilon=0.60$, $D=0.10\text{m}$, $H=0.065\text{m}$

Viscosity [mPa s]	form.	non-form.	unclear
1.2	○	●	◐
1.5	□	■	
3.5	◇	◆	
4.8	△	▲	
13.4	▽	▼	
15.5	◑	◐	
26.4	◒	◑	

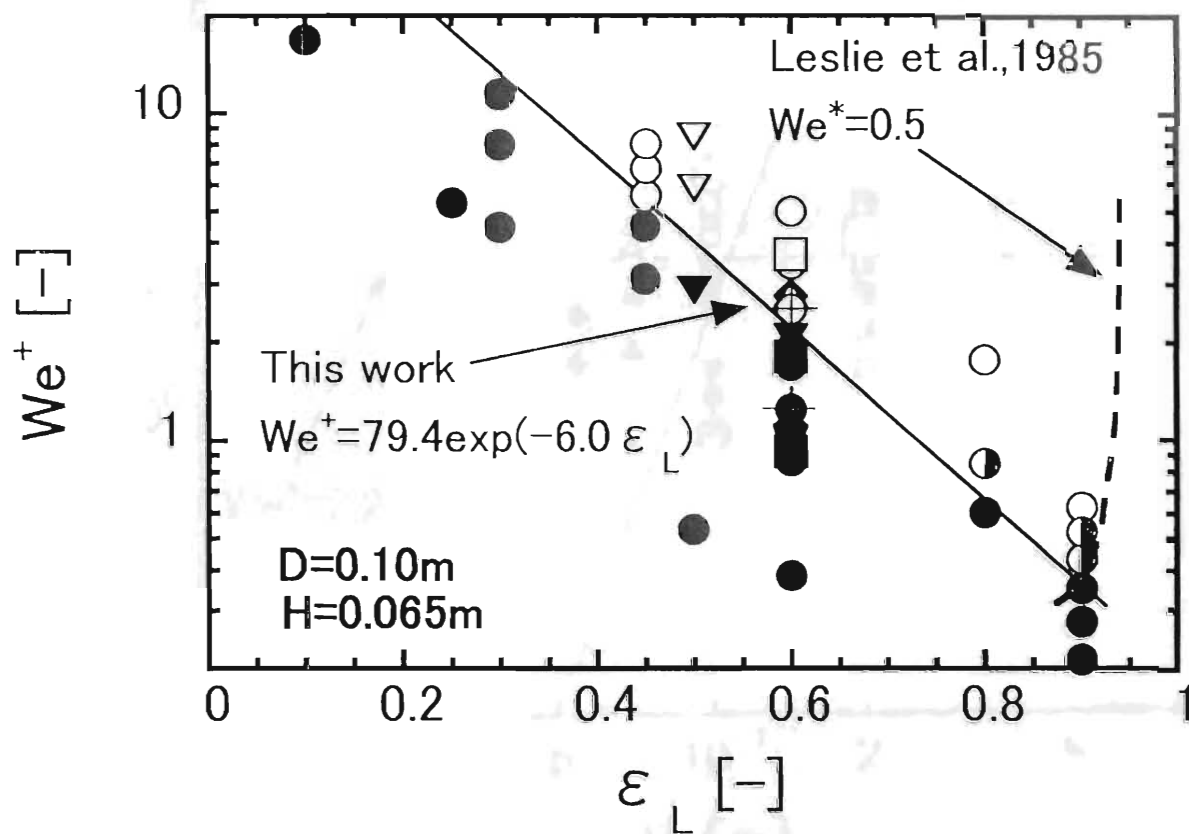


Fig.5-9 Effects of the volume ratio of the liquid/vessel and the Weber number on the formation of the air-liquid hollow profile.

D [m]	formation	non-formation	unclear
0.055	◇	◆	
0.070	△	▲	
0.100	○	●	
0.200	□	■	▣

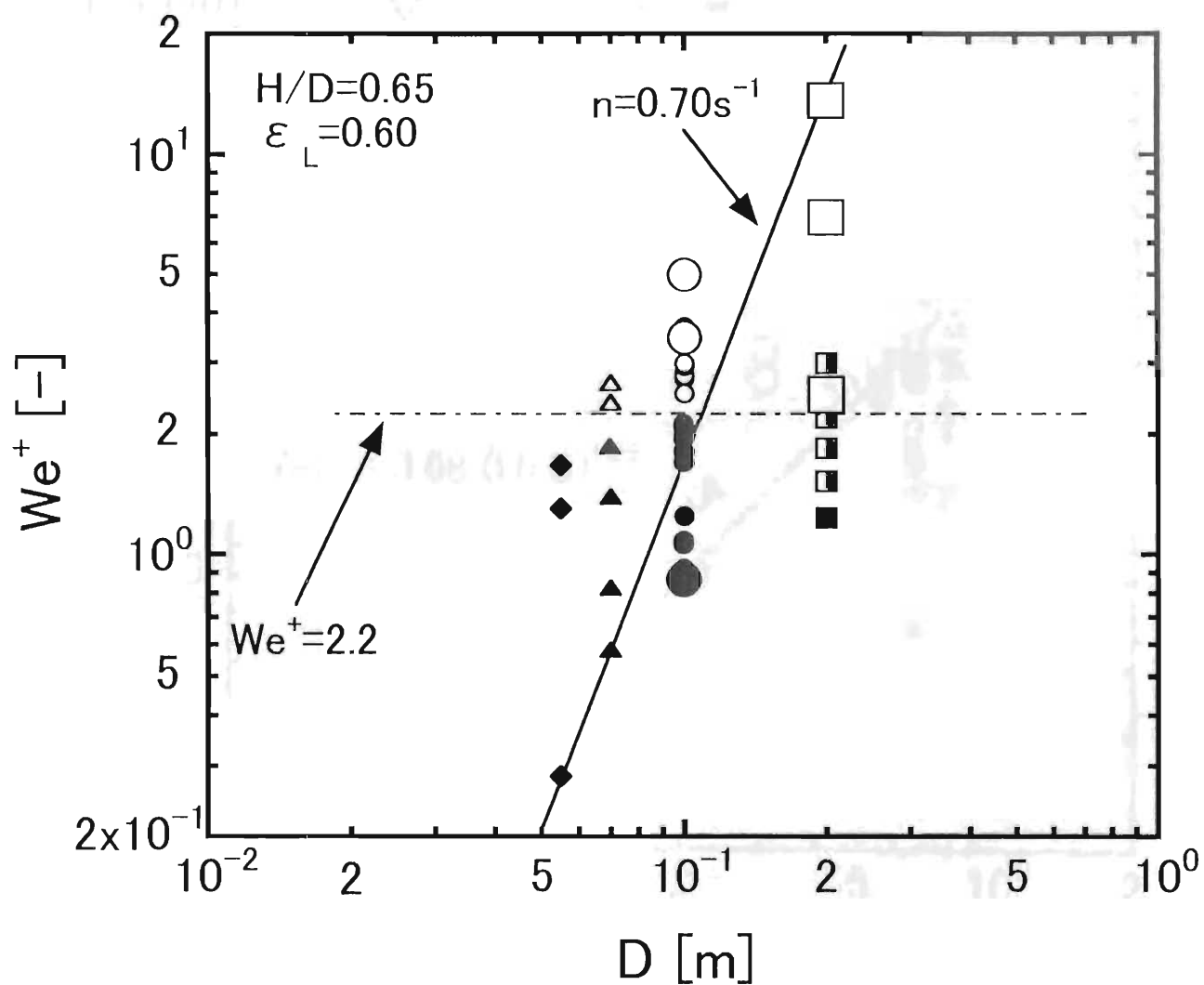


Fig.5-10 Effect of the vessel diameter and the Weber number on the formation of the air-liquid hollow profile

D [m]	formation	non-formation	unclear
0.055	◇	◆	◈
0.070	△	▲	◤
0.100	○	●	◐
0.130	▽	▼	◑

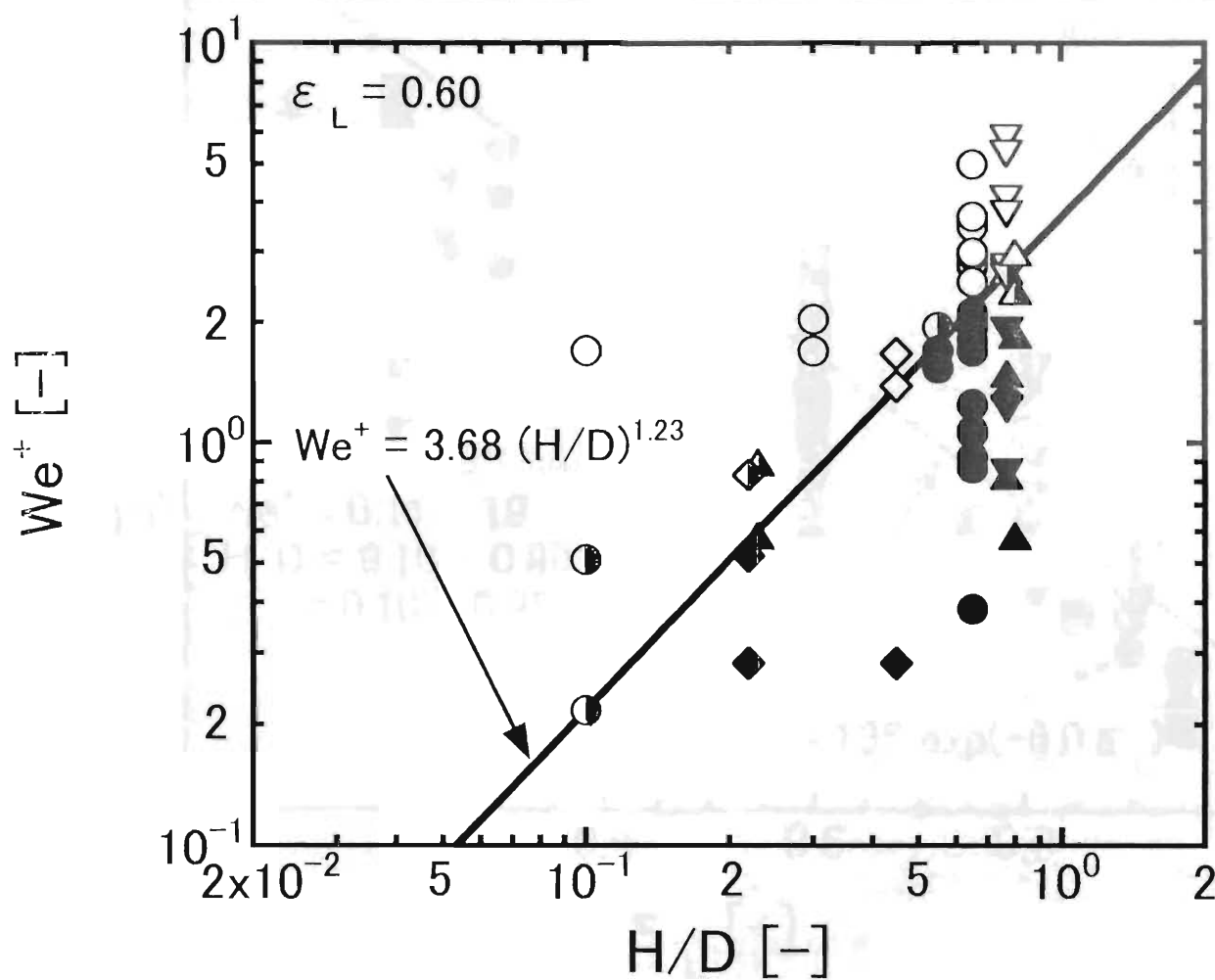


Fig.5-11 Effect of the aspect ratio of the vessel and the Weber number on the formation of the air-liquid hollow profile

D [m]	formation	non-formation	unclear
0.055	◇	◆	◈
0.070	△	▲	◤
0.100	○	●	◐
0.130	▽	▼	◃
0.200	□	■	◑

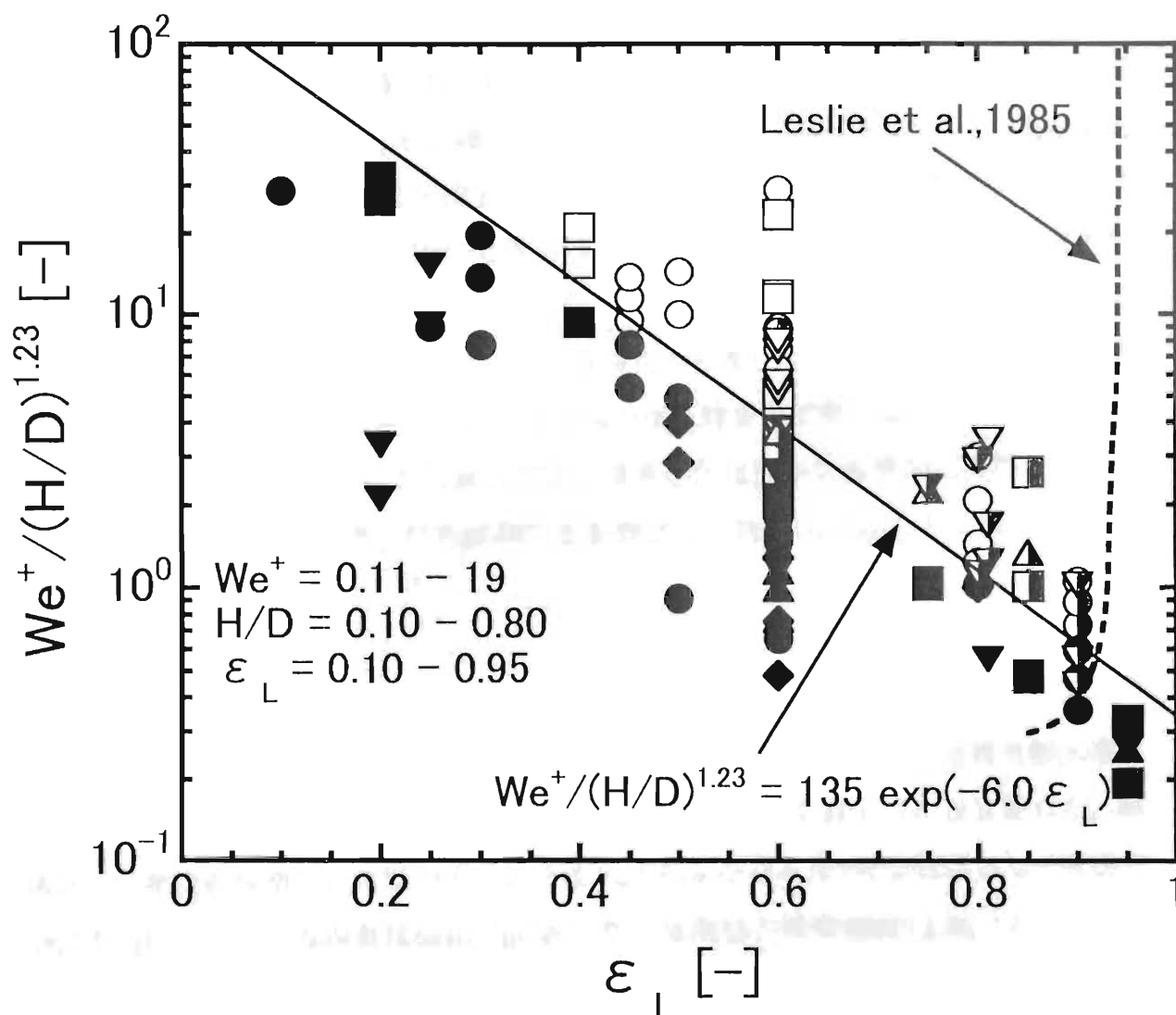


Fig.5-12 Formation map of the air-liquid hollow profile in the plot of the relationship between the modified Weber number and the volume ratio of liquid/vessel.

$D=0.055-0.20\text{m}$, $H/D=0.10-0.80$

第6章 微小重力下における気泡破裂(Ohiraら,1999b,1999c,2000d,2000e)

1 緒言

微小重力下において気液分散系を作り出すことを目的とした研究が行われるようになり、微小重力下における気泡生成(例えば、柘植・寺沢,1993;柘植ら,1994; Kimら, 1994)、気泡移動(奥沢ら,1995;土師・棚澤,1991;山本ら,1995)など気液分散系を作り出す際に最も基本的なデータ取得が行われている。しかし、気液分散系が形成されても気泡が気液界面において破裂しない場合、泡沫層が形成されると予想される。長時間気泡が滞留すると物質移動速度が低下するなどの理由により培養効率が低下すると予想される。第4,5章において、 $10^{-1}G$ 程度の遠心力を系に与えることにより気液界面形状を一定形状に制御できることがわかった。微小重力環境用の培養器を作製する次の段階として、 $10^{-1}G$ 程度の低遠心力場における気泡の挙動について検討する必要がある。特に気泡が破裂するために要する時間は気泡の滞留時間を支配する。

第6章では、微小重力下にある液体中に生成させた気泡が気液界面に接触してから破裂するまでに要する時間、気泡破裂時間を測定し、地上1Gの場合と比較した。

2 実験装置及び方法

2.1 地上用実験装置

地上用実験装置をFig.6-1に示す。縦,横,高さ各200mmの亚克力樹脂製角形水槽を使用した。槽底部に外径約6mm,内径約5mmのプラスチック製ノズルを設置した。液体として煮沸後放冷した常温のイオン交換水,水飴水溶液を用いた。気体として常温の空気をを用いた。仕込み液量は $4 \times 10^{-4} m^3$ とした。気泡発生頻度: $0.017-1.0 s^{-1}$ とした。液粘度は $1.1-36.2 mPa \cdot s$ の範囲で変化させた。Fig.6-2に気泡が上昇,移動,破裂する際のビデオカメラ映像の一例を示す。気泡が上昇し(Fig.6-2(a))、気液界面と接触(Fig.6-2(b))した後に破裂(Fig.6-2(c))する様子を容器側面に固定したビデオカメラで60分間連続撮影し、回収した後にビデオデッキで気泡の挙動を1/30s間隔で観察した。気泡が気液界面に接触してから破裂するまでに要した時間、気泡破裂時間 t_b を求めた。

2.2 微小重力用実験装置

Fig.6-3に実験装置の概略図を、Table6-1に実験条件を示す。回転容器として内径100mm又は200mmの亚克力樹脂製円筒容器($H/D=0.65$)を用い、ノズルとして外径2mm,

内径0.5mmのステンレス鋼管を使用した。ノズルは容器壁に壁から5mmの位置に1つ設置した。液体、気体として蒸留水(和光純薬製)、空気を用いた。液量率は0.60($0.31 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 、 $2.45 \times 10^{-3} \text{ m}^3$)、気泡発生頻度は0.5-2.0s⁻¹とした(地上1Gにおけるガス流量は5-20ml・min⁻¹)。容器回転速度は0.50-0.70s⁻¹とした。落下実験は(株)地下無重力実験センター(10⁻³G以下,10秒)を使用した。気泡破裂時間 t_B は気液界面の形状が安定する落下後5秒以降のデータを用いて、地上実験と同様の方法で求めた。Fig.6-4に気泡が上昇,移動,破裂する際のビデオカメラ映像の一例を示す。気泡が回転中心に向かって移動し(Fig.6-4(a))、気液界面と接触(Fig.6-4(b))した後に破裂(Fig.6-4(c))するまでを容器と同回転のビデオカメラで撮影した。落下装置からビデオテープを回収した後、1/30間隔で気泡の挙動を観察した。この映像から気泡が気液界面に接触してから破裂するまでに要した時間、気泡破裂時間 t_B を求めた。

3 実験結果及び考察

3.1 気泡径

本実験では、気泡径を一定にして気泡破裂時間を検討する。Table6-2に示すように、微小重力実験での気泡径は約5mmであった。地上1Gにおいて外径2mm,内径0.5mmのステンレス鋼製ノズルを用いた場合、気泡径は3mm程度と計算される。そこで、地上1Gにおける検討を行う場合も同じ気泡径になるよう、デジフィットのチップをノズルとして使用した。その結果、気泡径約5mmの気泡をつくり出すことができた。

3.2 液粘度の影響

蒸留水-空気系の気泡破裂時間分布のFig.6-5に示す。気泡破裂時間は0.20s付近に集中し、0.10s以下,0.30s以上の気泡は存在しない。平均気泡破裂時間 $t_{B,m}$ は0.193s、標準偏差 s は0.028sであった。液粘度の増加により気泡移動速度は小さくなることから、気泡の持つ運動エネルギーと気泡破裂時間の関係を調べるため、水飴水溶液を使用して同様の実験を行った。水飴水溶液-空気系の気泡破裂時間分布をFigs.6-6~9に示す。水飴水溶液を使用した場合、破裂時間の大きい気泡が若干確認されたが、蒸留水の場合と類似した結果が得られた。Fig.6-10に平均気泡破裂時間 $t_{B,m}$ と液粘度の関係を示す。本実験範囲において、平均気泡破裂時間は液粘度にほとんど関係なく一定となった。しかし、本実験条件では気泡破裂時間が液粘度の増加にともない変化しなかった。これは、気泡破裂時間に及ぼす気泡移動速度の影響はほとんどないことを示唆している。

3.3 気泡発生頻度の影響

水-空気系で気泡発生頻度を变化させた場合について気泡破裂時間に及ぼす気泡発生頻度の影響を実験的に検討した。Fig.6-11に平均気泡破裂時間と気泡発生頻度の関係を示す。気泡発生頻度が $0.017\text{--}0.33\text{s}^{-1}$ では平均気泡破裂時間にほとんど差異が認められなかったが、 1.0s^{-1} では平均気泡破裂時間が若干短くなった。これは、前に破裂した気泡が作り出す波紋の影響によるものと考えられる。

3.4 気泡形状の影響

気泡形状は気泡Reynolds数($=\rho d_{bu} / \mu$)によって分けられる(日本機械学会,1989)。Table6-3に重力場、遠心力場(ノズル先端における遠心加速度を使用)における気泡形状とReynolds数範囲を示す。上述したように、地上1Gで液粘度を変化させた場合のReynolds数範囲は $69 < \text{Re} < 2.0 \times 10^3$ であった。これは気泡形状が球形、回転楕円、キノコ状または冠球状であることを示している。しかし、平均気泡破裂時間に変化は見られなかったことから、平均気泡破裂時間に及ぼす気泡形状の影響は無いことがわかった。

遠心力場で内径200mm容器を用いた場合について気泡Reynolds数を計算すると $\text{Re} = 1.4 \times 10^3$ であり、形状は回転楕円になる(日本機械学会,1989)。これは、観察結果と一致している。

3.5 遠心加速度の影響

上述した実験結果から、気泡破裂時間は気液界面と気泡が接触した後の状態により決まることがわかった。

Fig.6-12に微小重力下における平均気泡破裂時間と気泡に作用する遠心加速度の関係を示す。横軸は遠心加速度と標準重力加速度の比である。遠心加速度は気泡の旋回半径と、気泡の旋回速度から算出した角速度で算出した。平均気泡破裂時間をkeyで、標準偏差をエラーバーで示した。内径100mmの容器を用いた場合、エラーバーはkeyの大きさよりも小さいため、見かけ上現れていない。これは、測定対象となる気泡数が2個と少ないため標準偏差が小さく算出されているためである。

容器回転速度 0.70s^{-1} (0.047G)の場合、気泡発生頻度変化させても平均気泡破裂時間はほとんど同じであった。これは、気泡発生頻度が大きすぎるためであると考えられる。遠心加速度が小さくなると、平均気泡破裂時間は大きくなる傾向を示し、次式で相関することができた。

$$t_{B,m} = 0.16(r\omega^2/g_0)^{0.38} \quad (6-1)$$

これより、気液界面に到達した気泡の気液界面を押す力が気泡破裂時間に関与していることがわかった。

4. 結言

気泡滞留時間を支配する因子として、気液界面に接触した気泡が破裂するまでに要する時間、気泡破裂時間を地上1G及び微小重力環境下の遠心力場で実験的に検討した。地上1Gでは平均気泡破裂時間は液粘度、気泡形状に関係なくほぼ一定であった。また、微小重力環境下の遠心力場では、液体中の気泡に作用する遠心加速度が小さくなると平均気泡破裂時間は大きくなり、次式で表すことができた。

$$t_{B,m}=0.16(r\omega^2/g_0)^{-0.38}$$

気泡破裂時間は上昇気泡の持つ運動エネルギーではなく、気液界面と気泡が接触した後、気泡に作用する力により決まる。

Table 6-1 Experimental conditions

(on 1G)

Volume ratio of liquid/vessel	0.60
Vessel size	200mm x 200mm x 200mm
Liquids	Distilled water
Liquid temperature	room temperature
Bubble frequency	$0.017-1.0s^{-1}$

(under microgravity)

Rotating speed of vessel	$0.50 - 0.70s^{-1}$
Volume ratio of liquid/vessel	0.60
Vessel size	$D=0.10m$, $H=0.065m$ or $D=0.20m$, $H=0.13m$
Liquids	Distilled water
Liquid temperature	293-295K
Bubble frequency	$0.5-2.0s^{-1}$

Table 6-2 Bubble diameter

$r\omega^2/g_0$ [G]	bubble frequency [s ⁻¹]	number [-]	$d_{B,m}$ [mm]	standard deviation [mm]
1	0.017	55	5.09	0.16
0.047	0.5	7	5.11	0.60
0.047	1.0	12	4.71	0.62
0.047	2.0	20	4.65	0.51
(0.047	0.5-2.0	39	4.74	0.56)
0.024	0.5	2	5.17	0.14
0.023	0.5	2	5.01	0.09

Table 6-3 Relationship between the bubble shape and the Reynolds number

(日本機化学会, 1989)

bubble shape	moving	On the ground (1G)	Microgravity (0.1G)
sphere	straight	$Re < 633$	$Re < 1046$
spheroid	spiral or zigzag	$633 < Re < 1112$	$1046 < Re < 2000$
mushroom or crown		$1112 < Re$	$2000 < Re$

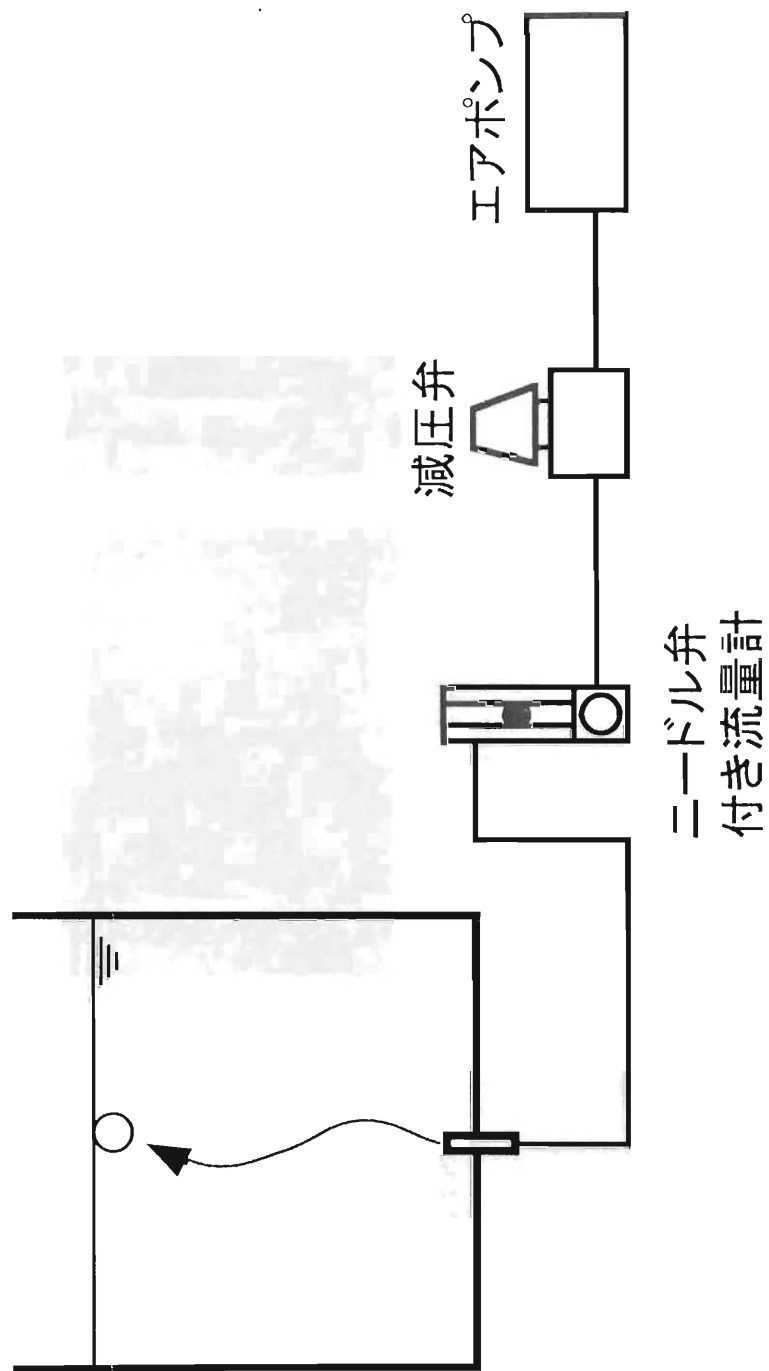


Fig.6-1 Experimental setup for IG

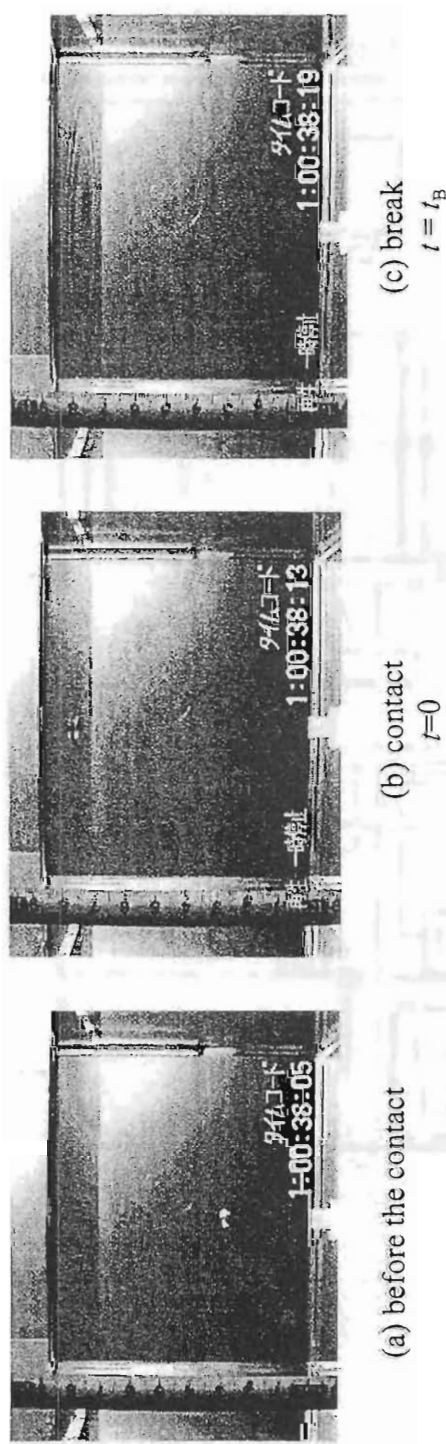


Fig.6-2 Typical images of bubble break on the ground (1G)

$Q_g = 0.07 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, $d_N = 5 \text{ mm (inner)}$, 6 mm (outer)

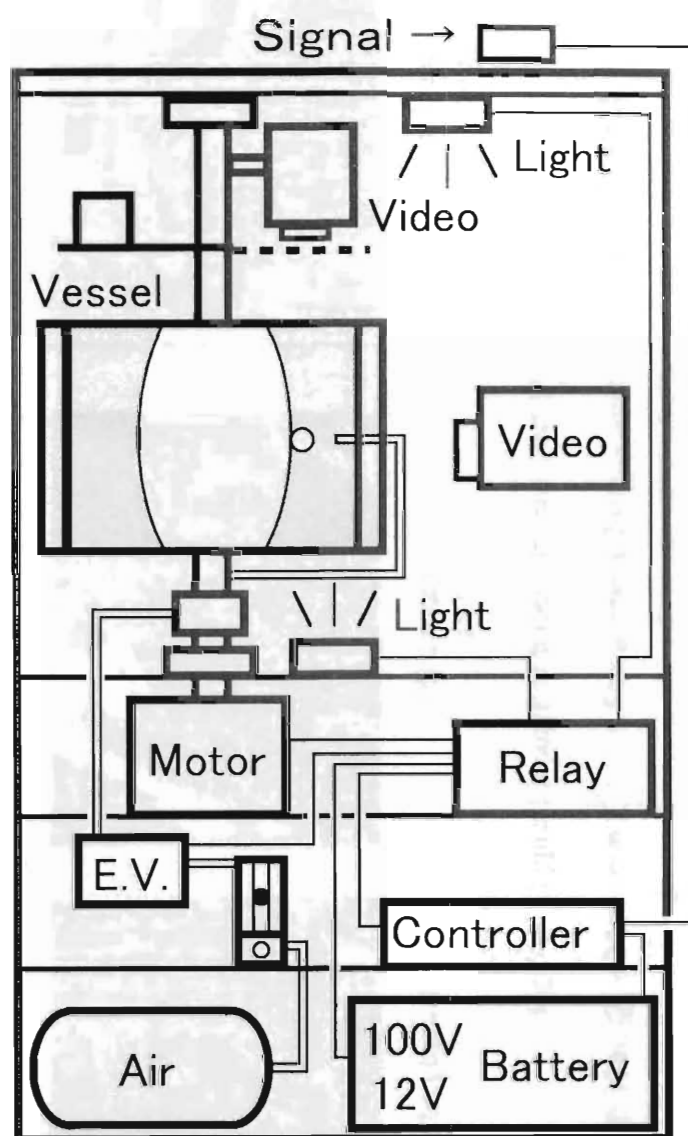
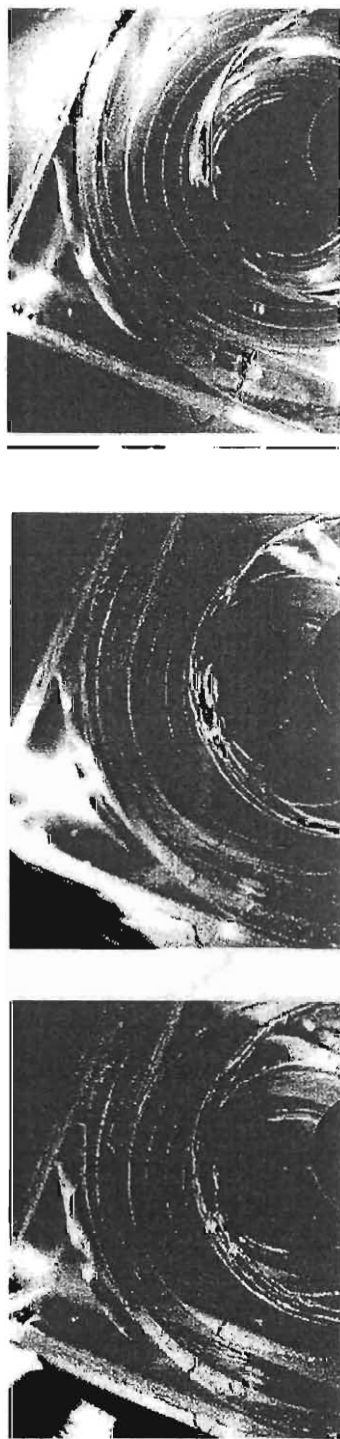


Fig.6-3 Experimental setup for microgravity



(a) before the contact

(b) contact
 $t=0$

(c) break
 $t=t_B$

Fig.6-4 Typical images of bubble break under microgravity

$D=0.20\text{m}$, $Q_g = 20\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$, $d_N = 0.5\text{mm}$ (inner), 2.0mm (outer), $\eta = 0.70\text{s}^{-1}$ (0.047G)

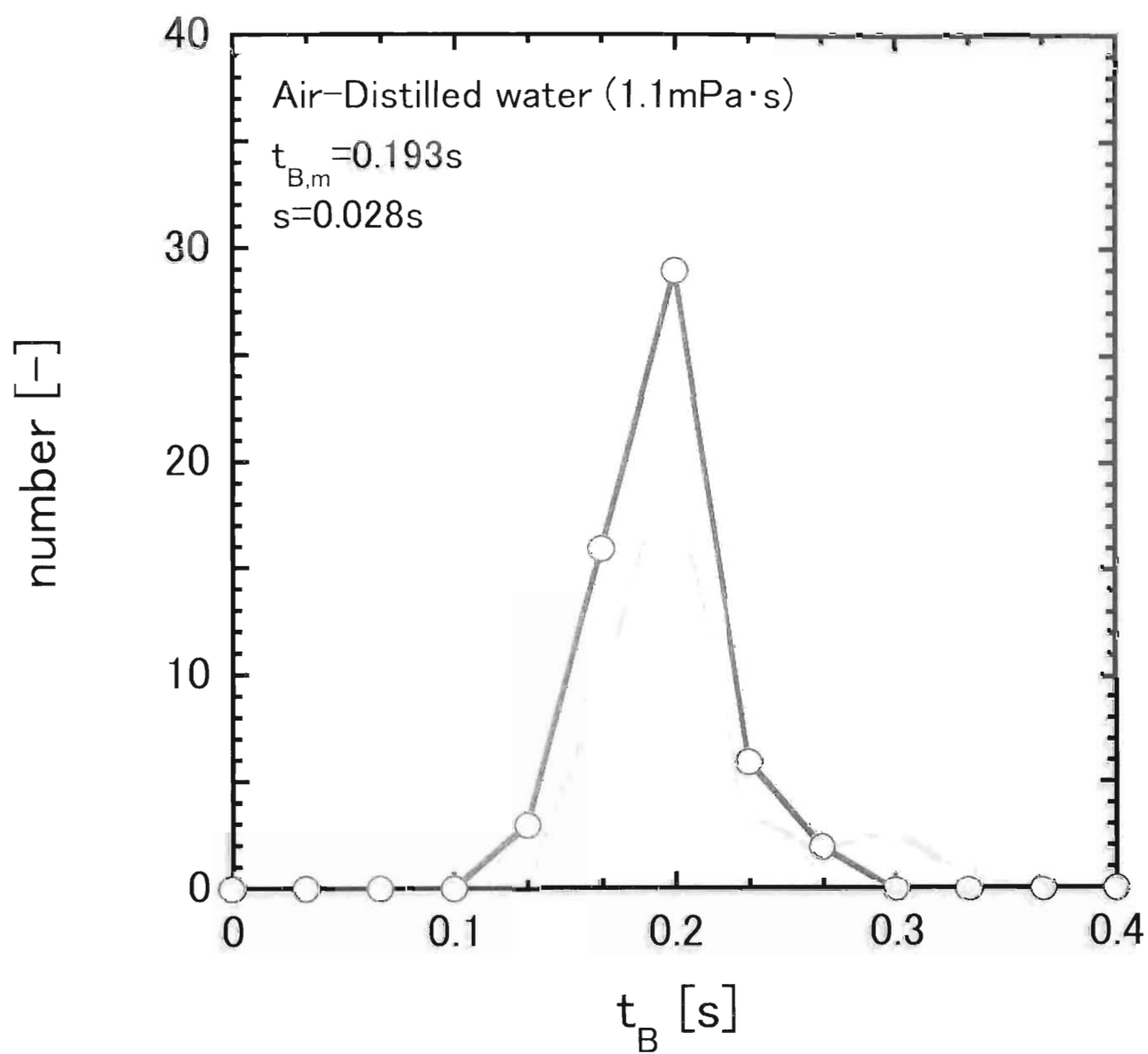


Fig.6-5 Profile of bubble break time (1G, air-distilled water, $\mu = 1.1\text{mPa}\cdot\text{s}$)

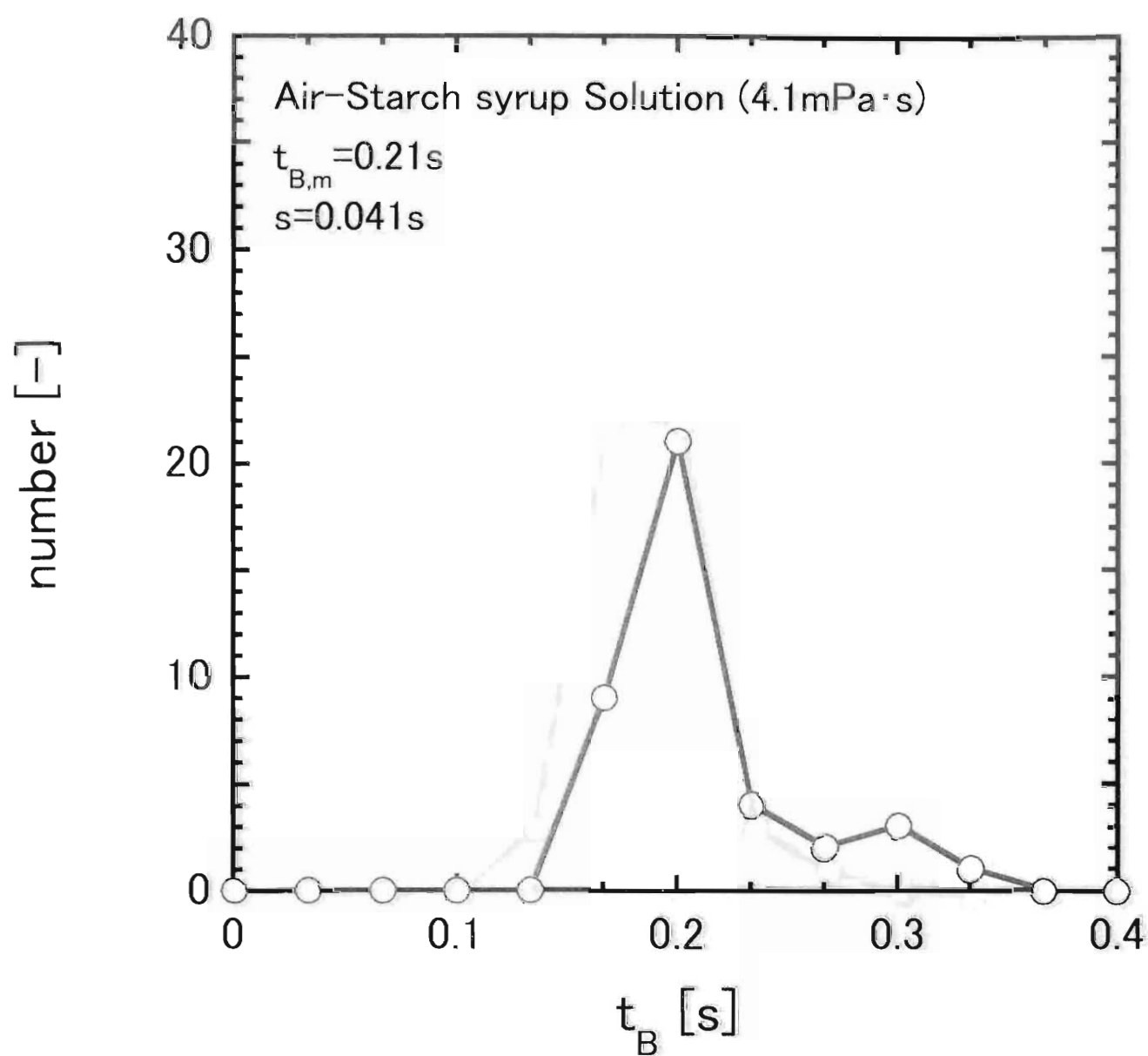


Fig.6-6 Profile of bubble break time (1G, air-starch syrup solution, $\mu = 4.1\text{mPa}\cdot\text{s}$)

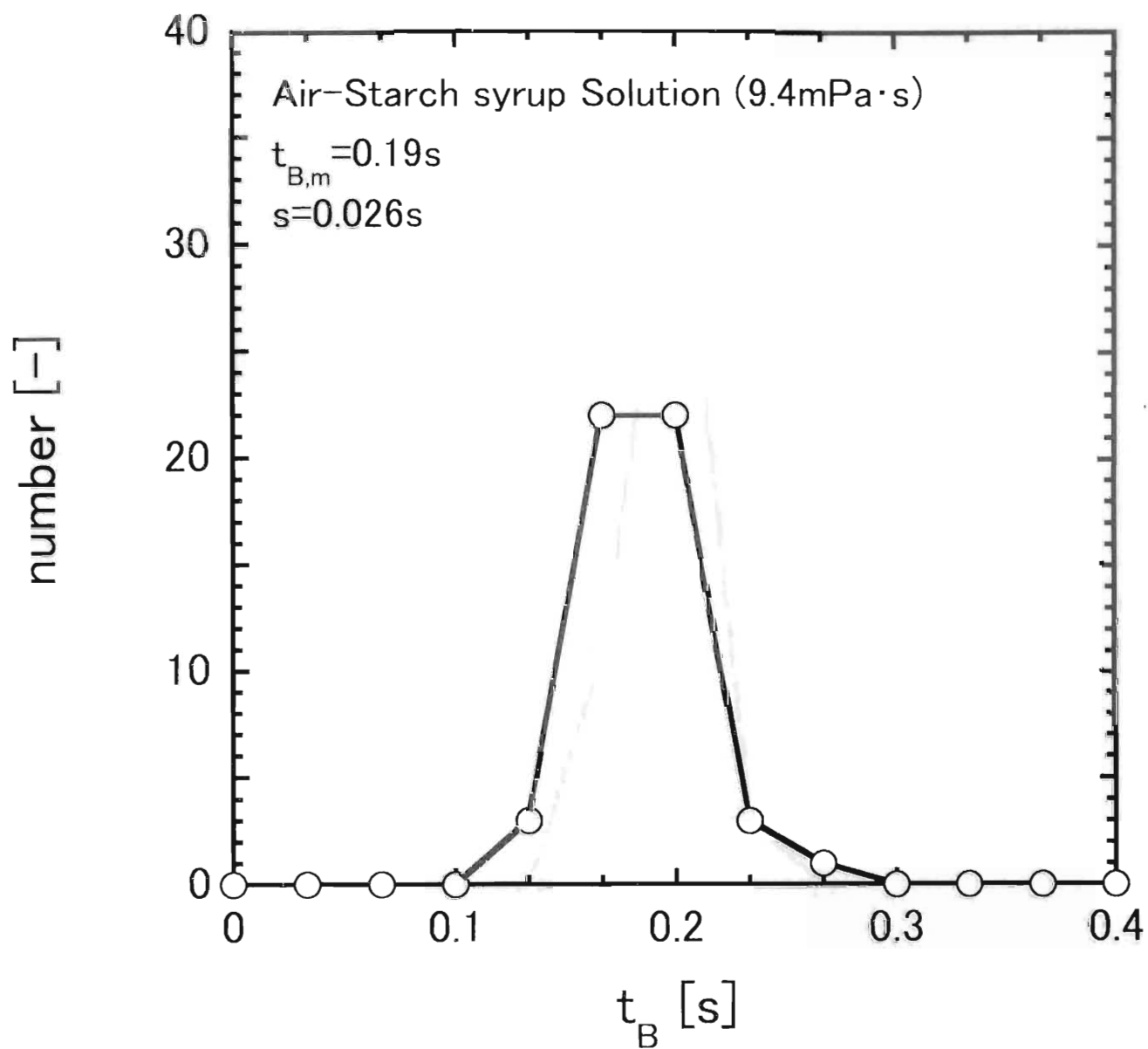


Fig.6-7 Profile of bubble break time (1G, air-starch syrup solution, $\mu=9.4\text{mPa}\cdot\text{s}$)

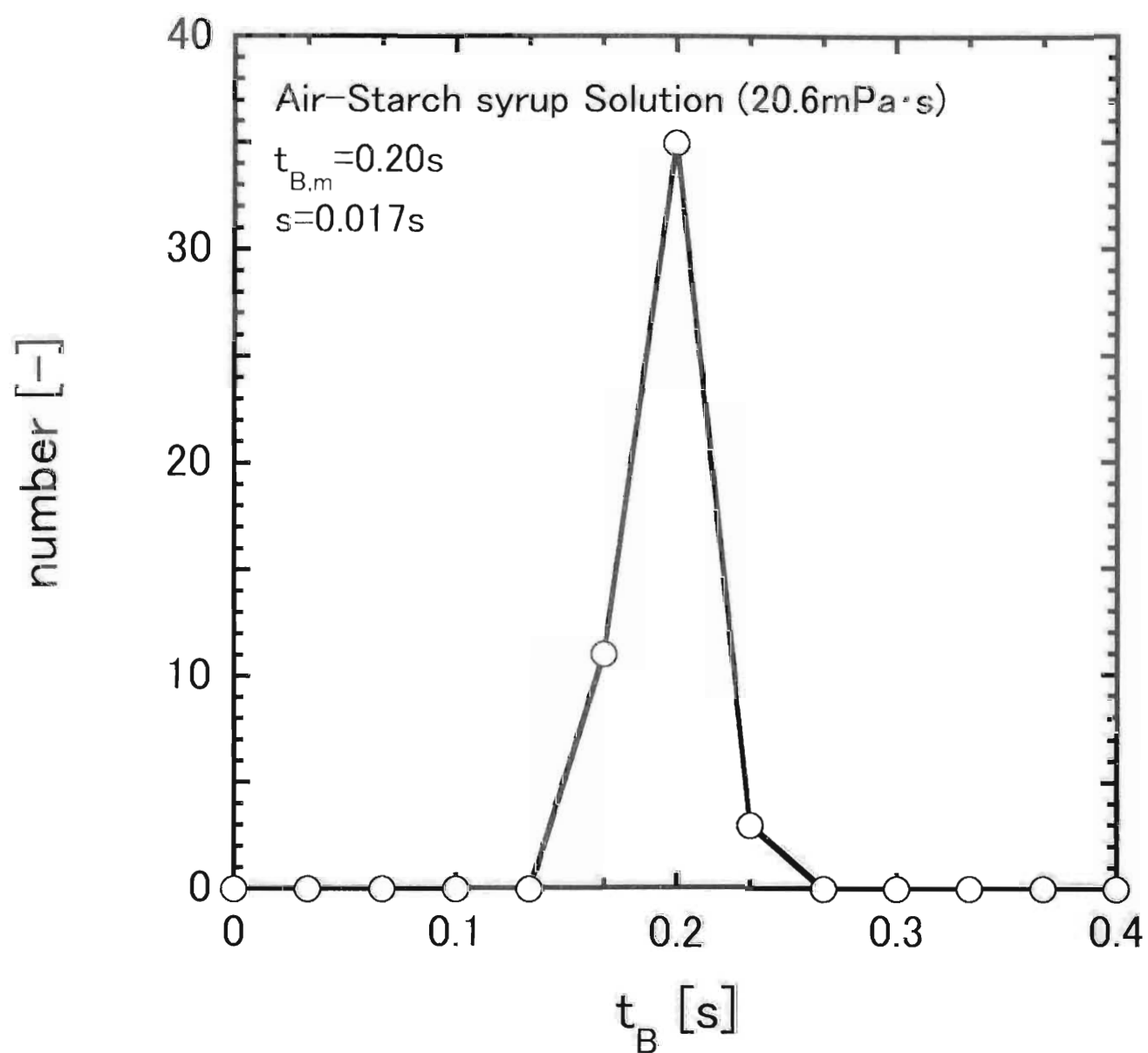


Fig.6-8 Profile of bubble break time (1G, air-starch syrup solution, $\mu = 20.6\text{mPa}\cdot\text{s}$)

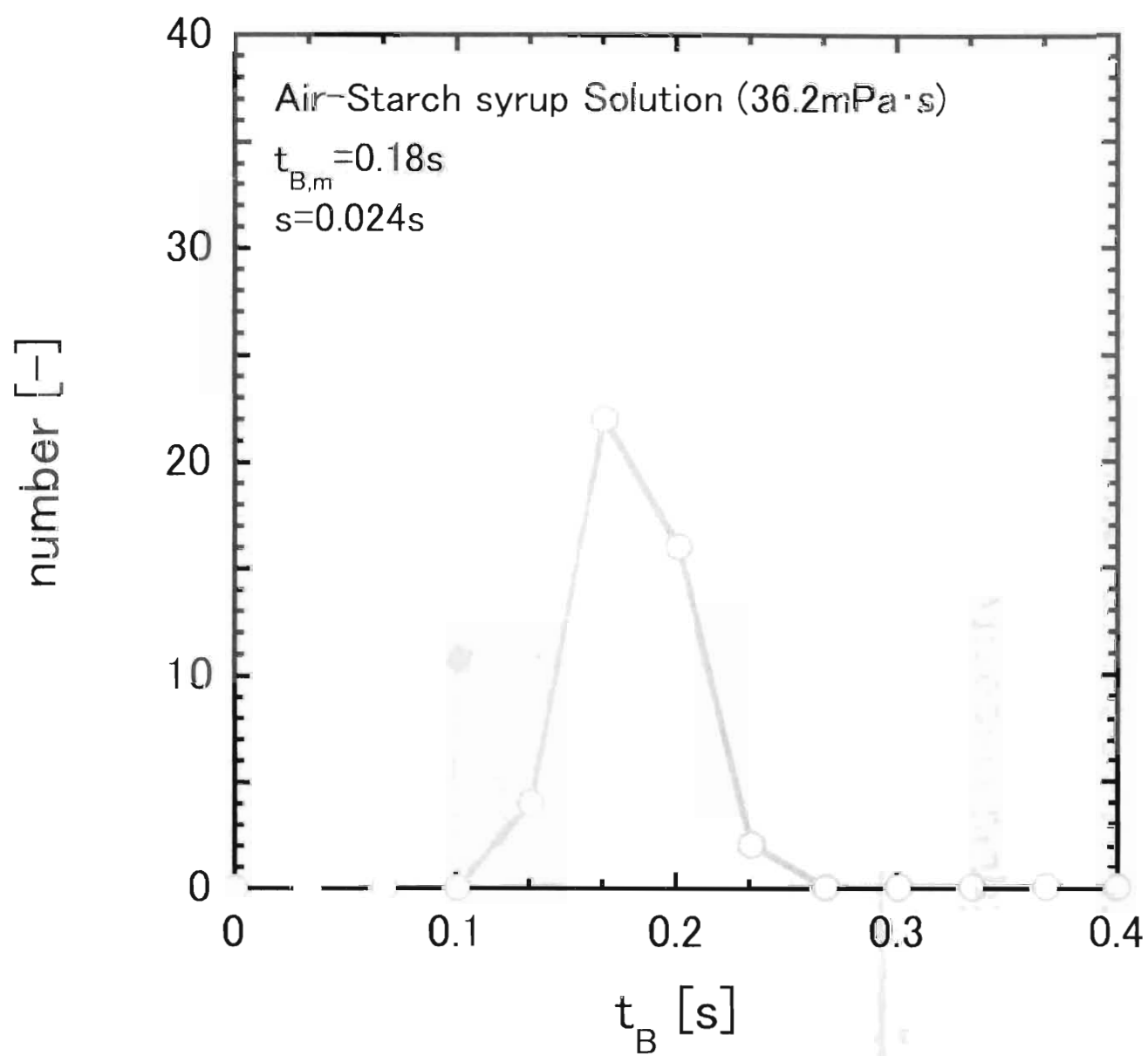


Fig.6-9 Profile of bubble break time (1G, air-starch syrup solution, $\mu=36.2\text{mPa}\cdot\text{s}$)

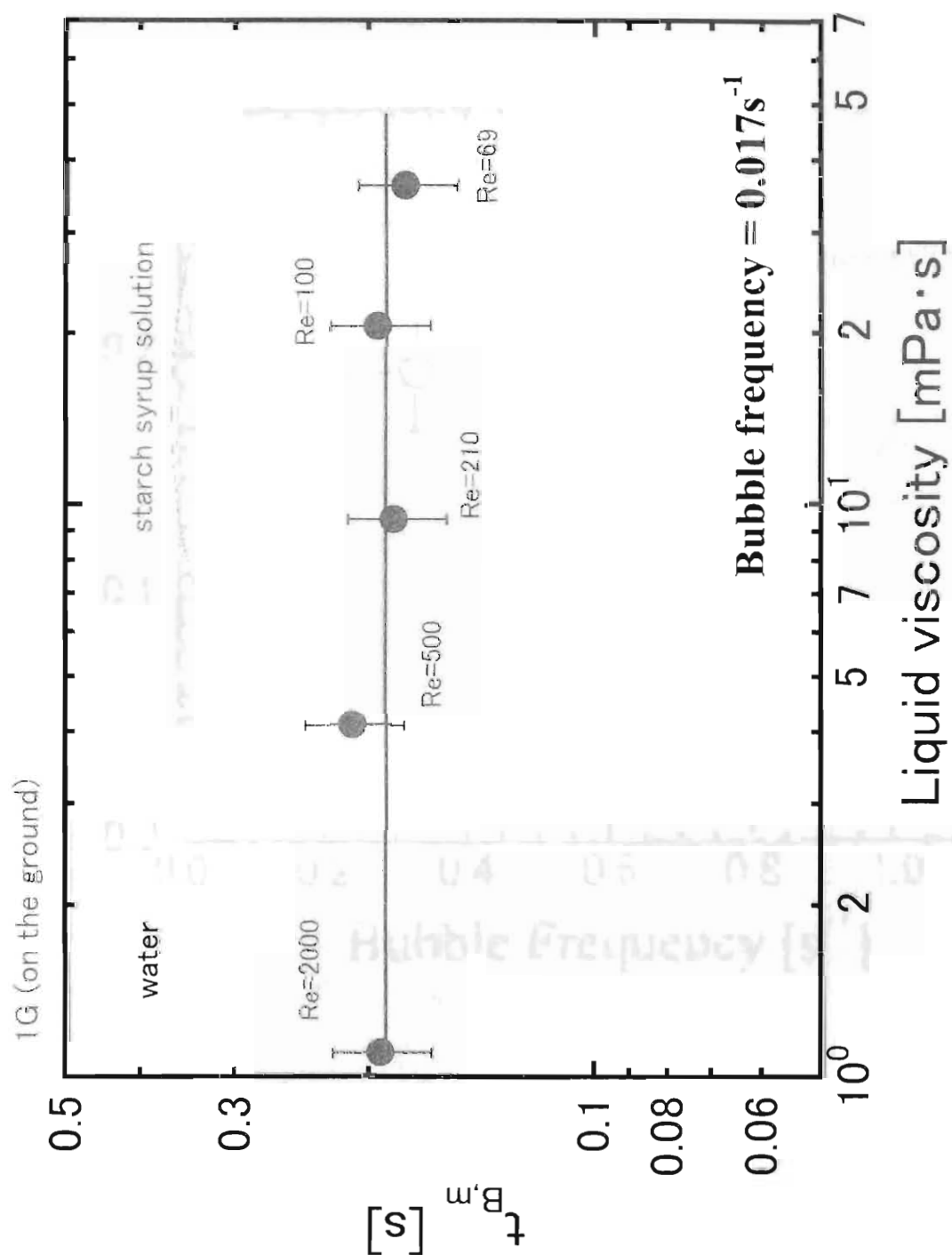


Fig.6-10 Effect of liquid viscosity on mean bubble break time (1G)

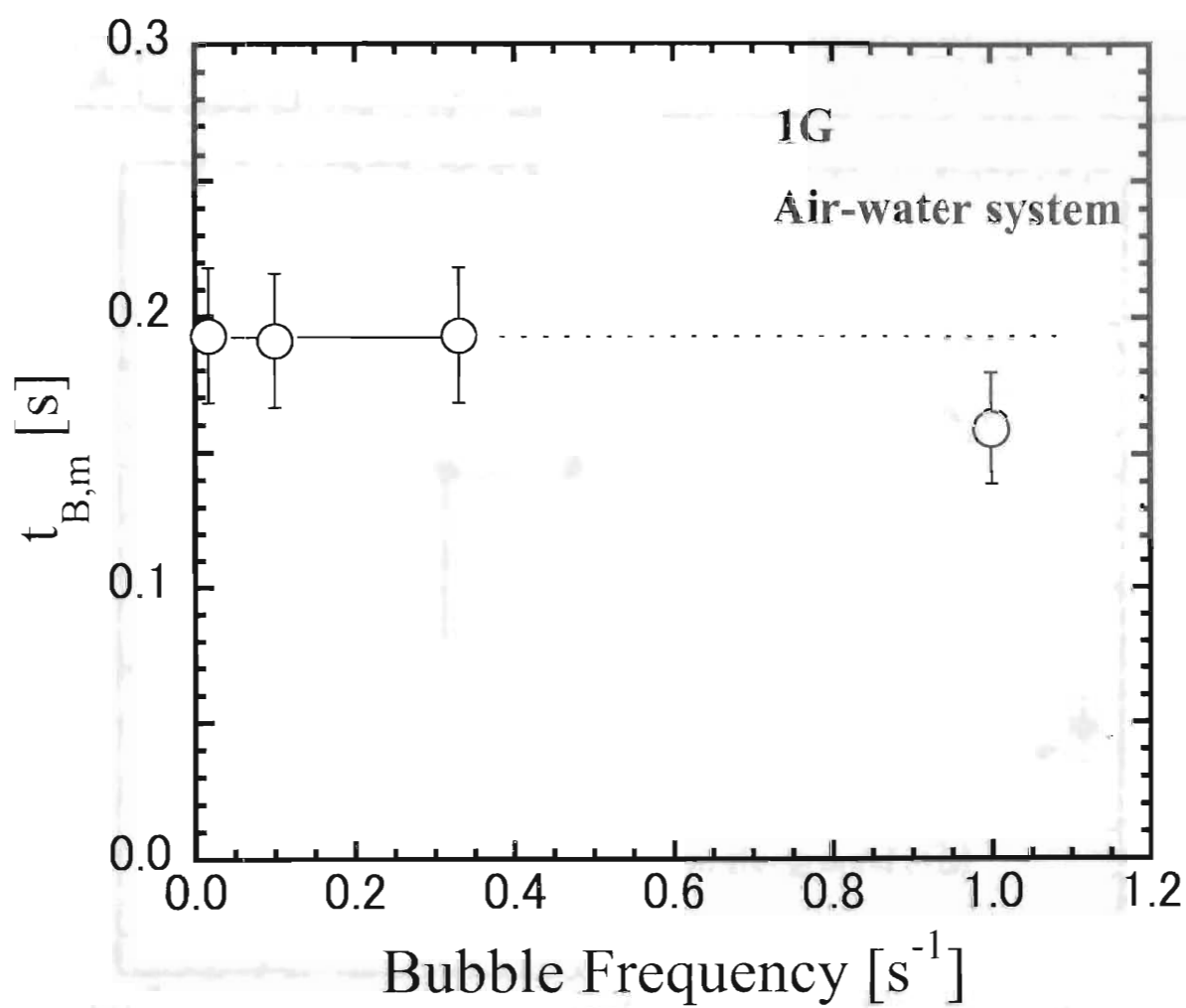


Fig.6-11 Effect of bubble frequency on mean bubble break time (1G)

key	G	Bubble frequency	vessel	number
◆	1	1/s	200x200x200	147
●	0.047	0.5-2.0/s	φ 200x130	14
■	0.024	0.5/s	φ 200x130	3
▲	0.023	0.5/s	φ 100x 65	2

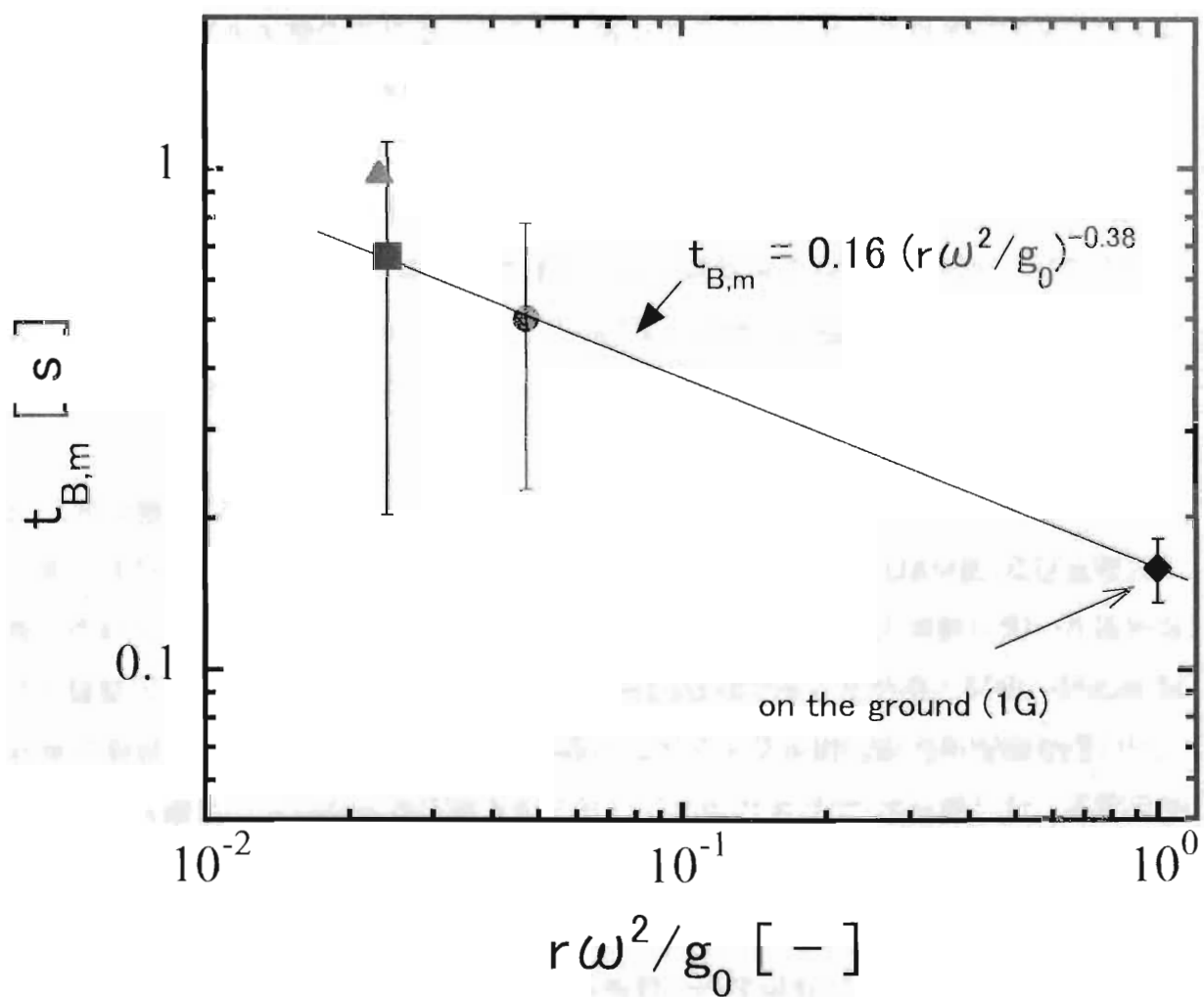


Fig.6-12 Effect of the ratio of centrifugal acceleration / gravitational acceleration
on mean bubble break time (1G)

第7章 通気エネルギーを利用した微小重力下における中空回転液層の形成

1. 緒言

微小重力環境で微生物を培養する培養器として、様々なスタイルの反応器が提案されているが、地上1Gのイメージが残っているものや、気液接触面積が小さい反応器が多い。これらの問題を解決するため、中空糸膜を使用して気液接触を行う装置も考案されているが、高圧装置を必要とすること、また、液中に溶解している気体の除去は可能であると予想されるが、微生物による目詰まりの他、実際に操作する場合多くの予期せぬトラブルが懸念される。そこで、微小重力環境に適した培養器開発及び運転が宇宙ステーションなどの微小重力環境下で本格的に行えるようになるまで、これまで地上1Gで培われてきた技術をほとんどそのまま使用できる微小重力環境用培養器を作製し、地上1Gと同様の操作が可能な生命維持システムを構築する必要がある。

第7章では気液接触を行う際に供給するガスの通気エネルギーを利用して中空回転液層をつくり出すことを目的として、ガス流量の影響、容器規模の影響、液物性の影響について実験的に検討した。

2. 実験装置及び方法

落下塔型微小重力実験施設として(株)地下無重力実験センター(JAMIC)及び北海道工業技術研究所(HNIRI)の落下施設を使用した。Fig.7-1に微小重力実験に用いた固定容器の概略図を示す。固定容器以外の装置仕様は第5章で示した装置と同様、動力部、制御部、記録部、ガス配管からなる。固定容器としてアクリル樹脂製円筒容器を用いた。ステンレス鋼製ノズルを容器接線方向に対して45度の角度で2本設置した。実験条件をTable7-1に示す。容器として内径100mm、高さ65mm($H/D=0.65, 0.51 \times 10^{-3} \text{m}^3$)または内径60mm、高さ46mm($H/D=0.77, 0.13 \times 10^{-3} \text{m}^3$)の2種類を用いた。液体として煮沸後放冷した室温のイオン交換水及びスピルリナ培養用の標準培養液(Table2-2参照)を用いた。供給ガスとして室温の空気をを用いた。ガス流量は $0.6-7.5 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 、液量率は0.60-0.81の範囲で変化させた。容積 $1.0 \times 10^{-3} \text{m}^3$ のサンプルシリンダにガスを充填し、レギュレータ、減圧弁、ニードル弁付き流量計、電磁弁を経た後、2分割して2本のノズルから容器に供給した。ノズルとして外径2mm、内径0.5mmのステンレス鋼管を使用した。レギュレータの出口圧力は $3 \text{Kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、減圧弁の出口圧力は $2 \text{Kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ に設定した。液

回転速度の指標として浮遊性プラスチックビーズ及び銅線で密度調整した沈降性プラスチックビーズを用いた。

落下実験では室温放置した所定の液体を固定容器内に入れ、ポータブル交流電源の電源を入れた状態で落下カプセルに搭載した。落下3分前にプログラマブルコントローラに信号を送り、照明、電磁弁、8ミリビデオカメラの電源を入れた。プログラマブルコントローラは信号受信から7分後、即ち落下4分後に全電源が切れるようにプログラムした。

3. 結果及び考察

3.1 ガス流量の影響

まず、地上1Gにおいてガス流量 Q_G とビーズ回転速度 n_B の関係を調べた。一例としてガス流量 $4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ の場合におけるビーズ回転速度の経時変化をFig.7-2に示す。ガス供給開始直後からビーズ回転数は増加し始め、約1分でほぼ一定となった。次にガス流量とビーズ回転速度の関係をFig.7-3に示す。本操作条件ではガス流量の増加とともにビーズ回転数は増加した。また、ビーズ回転速度の半径方向分布及び高さ方向分布を調べたところ、容器中央部、容器底面及び容器壁付近では極端に小さくなるものの、気泡が分散している領域ではほぼ一様であった。浮遊性ビーズの最大回転速度とガス流量の関係は、Fig.7-4に示すようにガス圧に関係なく、次式で近似することができた。

$$n_B = 0.0175(Q_G/D) \quad (7-1)$$

しかし、内径60mmの容器を使用した場合、ガス流量 $6 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 以上では排気口から飛沫同伴による液の排出が確認された。落下前から飛沫同伴による液排出が起きるとは落下時の液量率が変化すると予想されることから、内径60mmの容器を使用する場合は、これ以下のガス流量にとどめる必要がある。

以上の結果より、ガス流量を変化させることにより、容器内のビーズ回転数即ち液回転速度をある程度制御可能であることがわかった。

次に、中空回転液層の形成に必要な液回転速度を試算するため、第5章、Eq.(5-4)で示された可否分割式より、各液量率に対して必要な液回転速度を試算した。例えば、液量率0.81の場合、気液界面付近の液回転速度を 0.74 s^{-1} 以上とすれば中空回転液層が形成される。しかし、第4,5章で示した中空回転液層の形成実験結果を再解析したところ、Fig.7-5に示すように気液界面付近のビーズ回転速度 n_B が落下約4秒後に容器回転

速度の最大約半分まで減少し、その後容器回転速度 n の約7割まで回復していた。このことから、落下約5秒以降の定常状態における気液界面近傍の液回転速度は容器回転速度の0.7倍程度あれば中空回転液層が形成できたと予想される。

$$n_B = 0.7n \quad (7-2)$$

よって、液量率0.81の場合で中空回転液層が形成されるために必要な液回転速度は 0.52s^{-1} 以上であると予想される。この液回転速度を実現するガス流量はEq.(7-1)より、 $3.1 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 以上と算出される。各液量率に対する必要液回転数及び必要ガス流量の試算値をTable7-2に示す。試算した9条件の中で、中空回転液層の形成が可能であると予想される条件は、液量率0.60, ガス流量 $3.6 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ の場合、液量率0.81, ガス流量 $5.4 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ の場合の2条件である。

Fig.7-6にHNIRIで行った微小重力実験の結果を示す。示した映像は全て落下終了直前のものである。落下時間が短いため、気液流動が定常の気液流動状態を確認できない。しかし、Table7-2で形成可能と予測された2条件については中空状の気液流動状態が確認され、かつ、中空気相の周囲に気泡の旋回が確認された。このことから、中空回転液層の形成可能性が示唆された。その他の条件については落下直後に気液界面が湾曲するものの、下部に気泡が蓄積して気液界面を押し上げる現象が確認された。これより、中空回転液層の形成は困難であると予想される。

地上実験及びHNIRIにおける微小重力実験の結果をもとに、ガス流量を 2.0×10^{-3} - $7.5 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ の範囲で変化させ、JAMICにおいて微小重力実験を行った。Figs.7-7~11にJAMICで行った微小重力実験の結果を示す。ガス流量が 2.0×10^{-3} , $3.0 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ の場合、HNIRIで行った実験と同様に落下直後、気泡が湾曲した気液界面を押し上げが観察された。その後、容器中に多数の気泡が確認されるものの、気液界面の形状は確認できなくなった。落下実験終了後、回収された装置を観察したところ、容器外に水が排出されていた。排気口に取り付けたシリコンチューブに着目して録画された映像を見たところ、排気口から空気だけでなく水が排出されていると思われる映像の揺らぎが観察された。水が系外に排出されていることから中空回転液層の形成可否に関係なく安定した気液接触操作が不可能な操作条件であると予想される。ビデオには排気口から液が排出される際の音が録音されており、ガス流量 2×10^{-3} の場合は落下から約5.5秒後以降、ガス流量 $3 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ の場合は落下から約4.5秒後以降、水の排出音が確認された。気泡蓄積に伴う上部ガス相の排出時間を計算すると、

$$\text{ガス流量 } 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} : (0.204 \times 10^{-3}) / (2 \times 10^{-3}) / (60) = 6.1 \text{ s}$$

$$\text{ガス流量 } 3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} : (0.204 \times 10^{-3}) / (3 \times 10^{-3}) / (60) = 4.1 \text{ s}$$

となり、排出音確認の時刻とほぼ一致した。このことから、中空回転液層が形成されなかったことが確認できた。ガス流量 $4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ の場合、約1.3秒後に気液界面と底面の接触が確認されたこと、上蓋の排気口周辺には気固接触面が形成されていたことから中空回転液層の形成が確認された。その後、中空気相周辺に直径約10mmの気泡が分散し、落下終了まで安定した中空回転液層を維持していたことから、気泡の生成・破裂が円滑に行われたことがわかった。この条件では排気口からの水の排出音は確認されなかった。さらにガス流量を 6.1×10^{-3} , $7.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ と大きくして実験を行ったところ、両条件とも落下約1秒後に中空回転液層の形成が観察された。回収した装置を観察したところ、排気口からの水排出が少量確認された。しかし、録画した映像により底面及び上蓋近傍など気泡群がほとんど存在していない部分を観察したところ、中空回転液層は形成されているように思われる。このことから、ガス流量が小さい場合と異なる機構で水排出が起こっていることが示唆させる。ガス流量が小さい条件ではガス相が排出された後、容器内の気泡間に存在する水が気泡に同伴排出されていたが、ガス流量が大きい条件では気泡破裂に伴う飛沫同伴による水排出であると予想される。

以上の結果から、内径100mm、高さ65mmの容器を用い、液量率0.60とした場合、中空回転液層を形成するための最適ガス流量は $4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ (単位液体積あたりのガス流量は約8vvmに相当)であることがわかった。

3.2 容器形状の影響

次に内径60mm、容器縦横比0.77の容器を用いて中空回転液層の形成に及ぼす容器規模の影響を液量率0.60で検討した。

まず、容器内径100mmの場合と同様、中空回転液層の形成条件から必要ガス流量を推算する。液量率0.60の場合、Eq.(5-6)より算出した値を0.7倍した必要液回転速度は 1.32 s^{-1} 、Eq.(7-2)より、必要ガス流量は $7.93 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ と推算される。次に、内径100mmの実験の結果、得られた必要ガス流量(約8vvm)から試算すると、今回用いた容器体積は $0.13 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ であることから必要ガス流量はその8倍の $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ となる。

上記の試算結果をもとにしてJAMICで微小重力実験を行った。ガス流量 2.4×10^{-3} ,

$4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ の2条件とした。これら2条件の結果をFigs.7-12,13に示す。両条件とも、排気口からの液体排出が激しく、中空回転液層の形成は確認できなかった。これら2条件において中空回転液層が形成されなかったことから、中空回転液層の形成に重要な因子は単位液体積あたりのガス流量ではなく、気液界面近傍の液回転速度であることが確認された。

3.3 液物性の影響

これまでに行った中空回転液層の形成実験はすべて水を用いたものである。しかし、実際にスピルリナの培養を行う場合、液体として培養液を使用することになる。そこで、スピルリナ培養用の標準培養液を使用して中空回転液層の形成実験を行った。

Fig.7-14に水-空気系で形成可能であったガス流量 $4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ の場合の実験結果を示す。落下直後は水-空気系同様の挙動を示し、中空回転液層が形成された。しかし、時間が経過するにつれ容器内は白濁し、排気口から液体が激しく排出されるようになった。これは飛沫同伴によるものとも考えられるが、単なる飛沫同伴であれば時間の経過とともに液の排出は激しくならない。これは、培養液中に蓄積した多数の破裂しにくい微細気泡によって中央部のガス相が減少し、中空回転液層が維持できなかったためであると予想される。

以上の結果から、液体として培養液を用いる場合、微細気泡の蓄積に伴う中央部ガス相の減少ををいかに防ぐかが今後の問題となる。

4. 本章の結論

気液分散系を作り出すために液中に供給するガスの通気エネルギーを利用した中空回転液層の形成を試みた。その結果、内径100mmの容器に水を液量率0.60で充填した場合、最適ガス流量は $4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ であった。また、容器規模の影響を検討した結果、第5章で示した中空回転液層の形成判別式で形成可否を推測することができた。

Table7-1 Experimental conditions

Vessel(Aspect ratio)	ϕ 100x65(0.65)
	ϕ 60x46(0.77)
Nozzle diameter	2mm(outer), 0.5mm(inner)
Volume ratio of liquid/vessel	0.60-0.81
Gas flow rate	$0.6 \times 10^{-3} - 7.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Gas	Air
Liquid	Distilled water
	Standard medium

Table7-2 Experimental conditions and results at HNIRI (○ :form., × :non-form.)

Q_G $[\times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$	$\varepsilon_i \quad [-]$				
	0.60	0.65	0.70	0.75	0.81
0.6					×
1.7	×				
2.9	×	×	×	×	×
3.6	○				
5.4					○
$We^+ \quad [-]$	2.2	1.6	1.2	0.88	0.62
$n \quad [s^{-1}]$	0.79	0.75	0.73	0.72	0.74
$Q_{G \text{ est}}$ $[\times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$	3.3	3.2	3.1	3.0	3.1

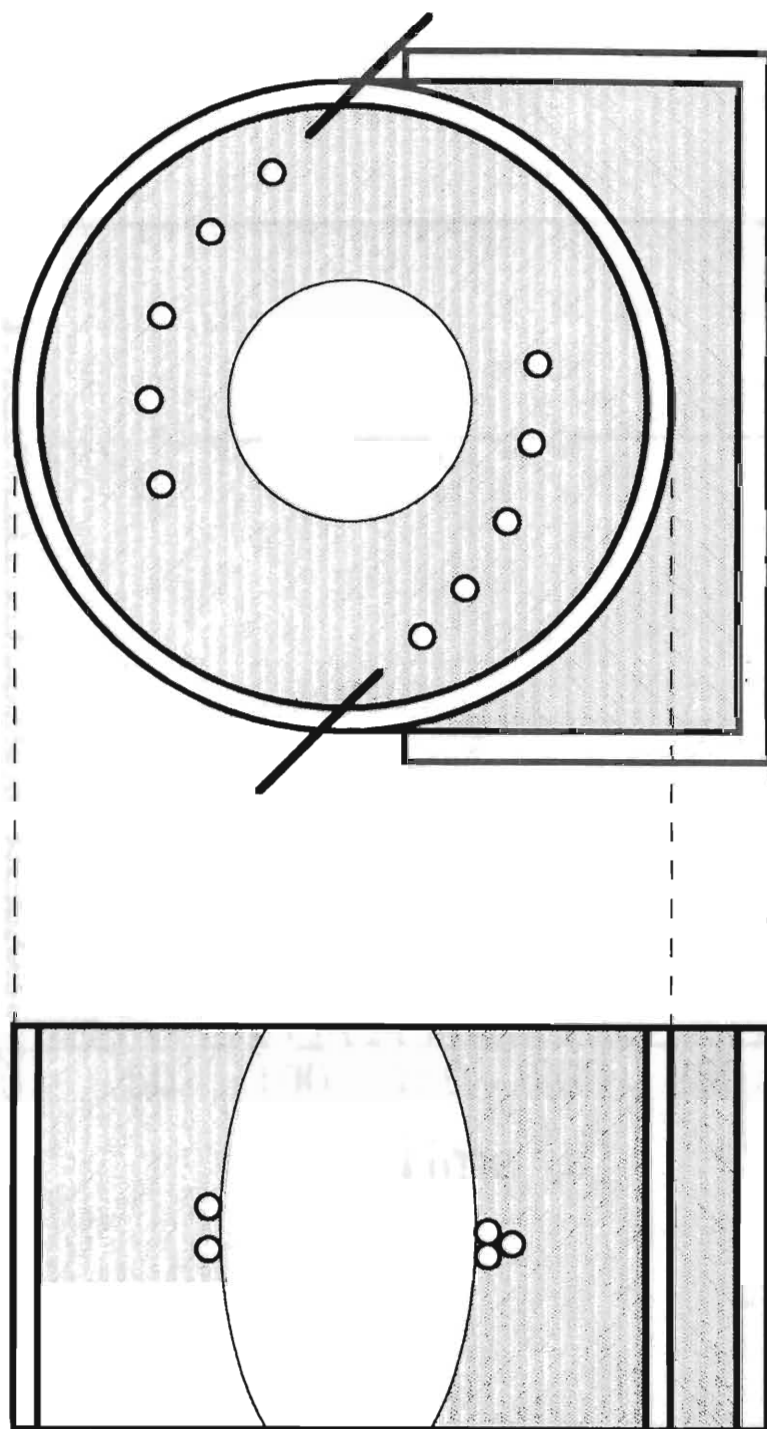


Fig.7-1 Schematic diagram of fixed vessel

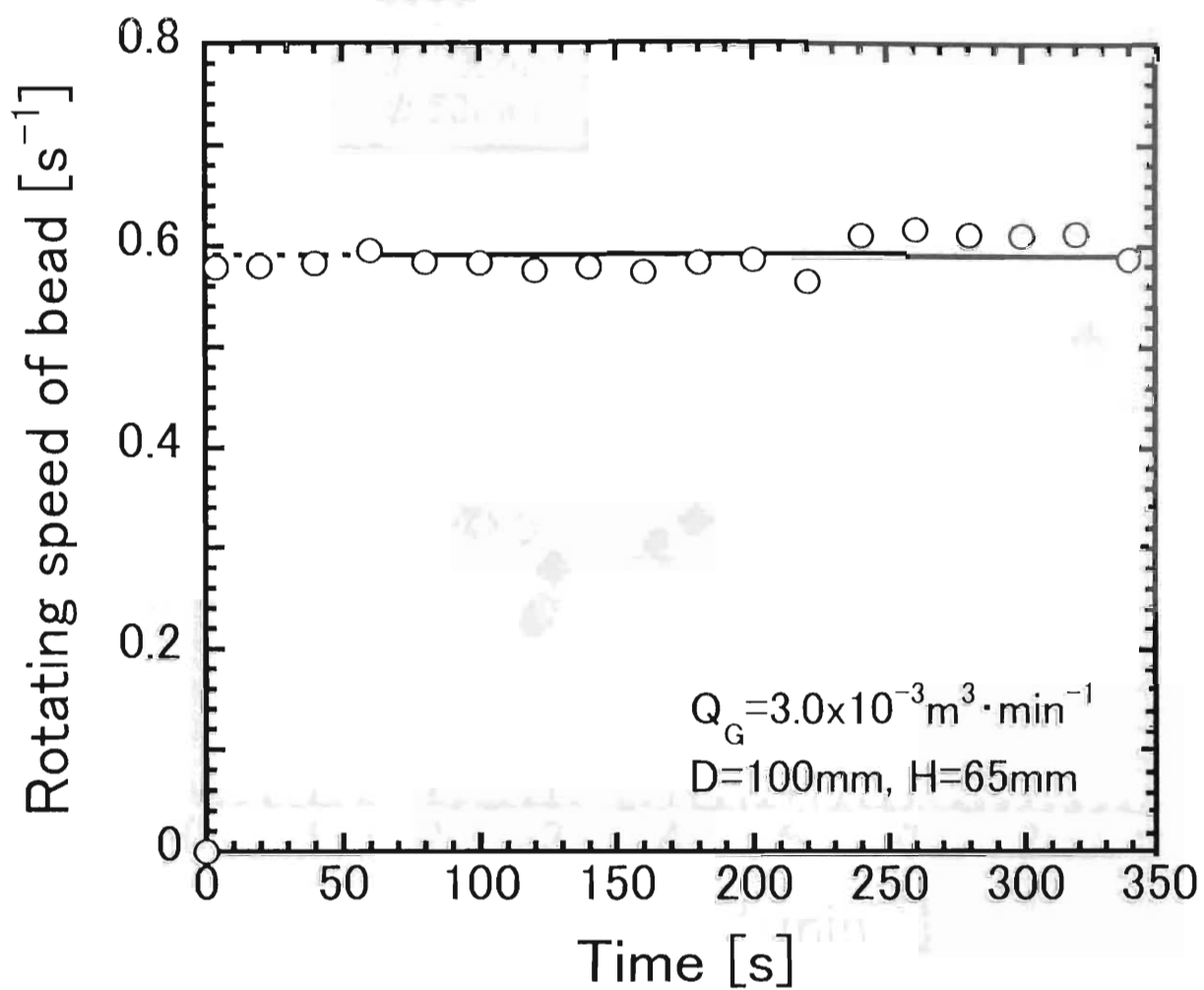


Fig.7-2 Rotating speed of bead as a function of time

$$Q_k = 3.0 \times 10^{-3} m^3 \cdot min^{-1}, D = 0.10m, \varepsilon_t = 0.60$$

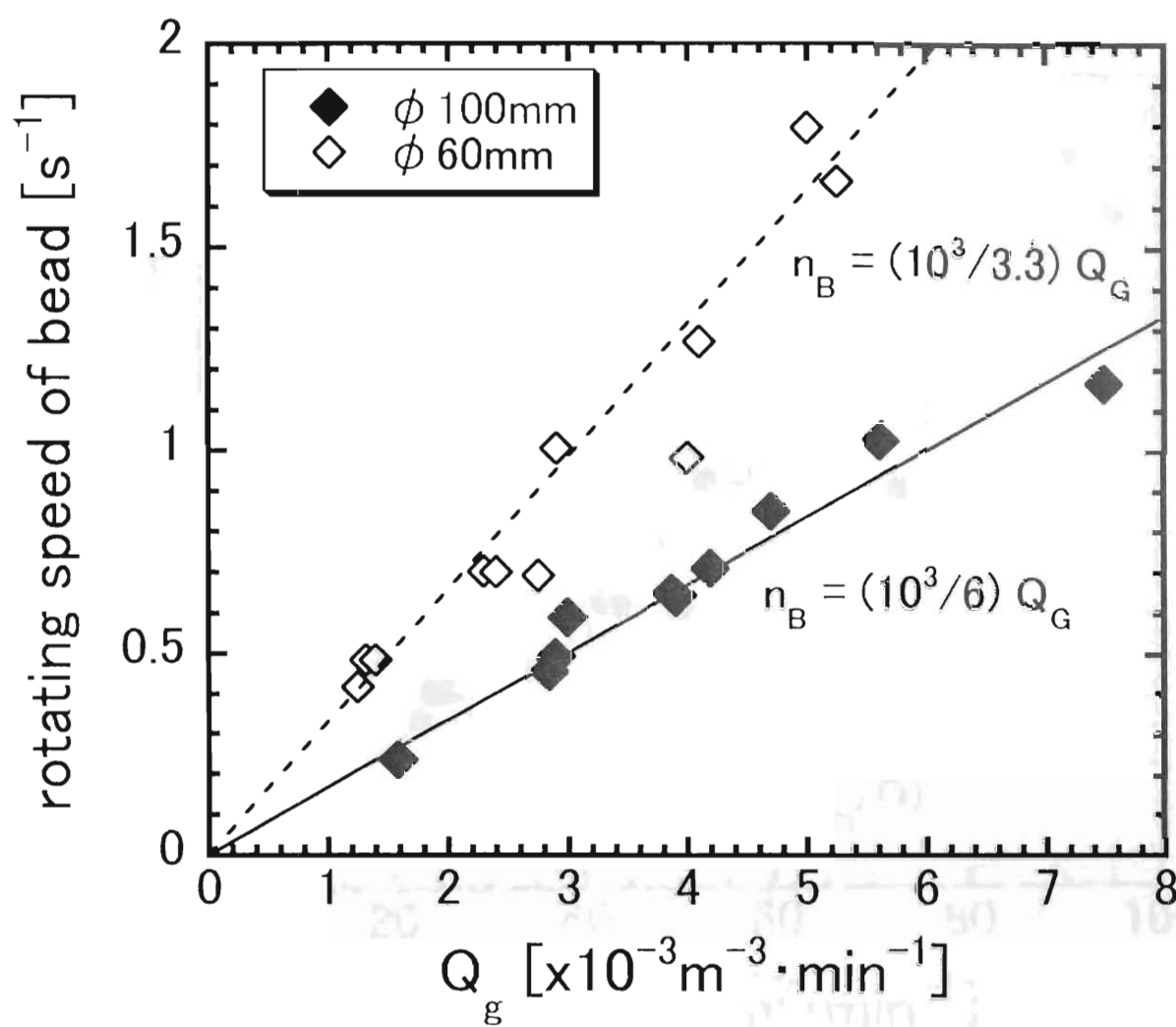


Fig.7-3 Effect of gas flow rate on rotating speed of bead

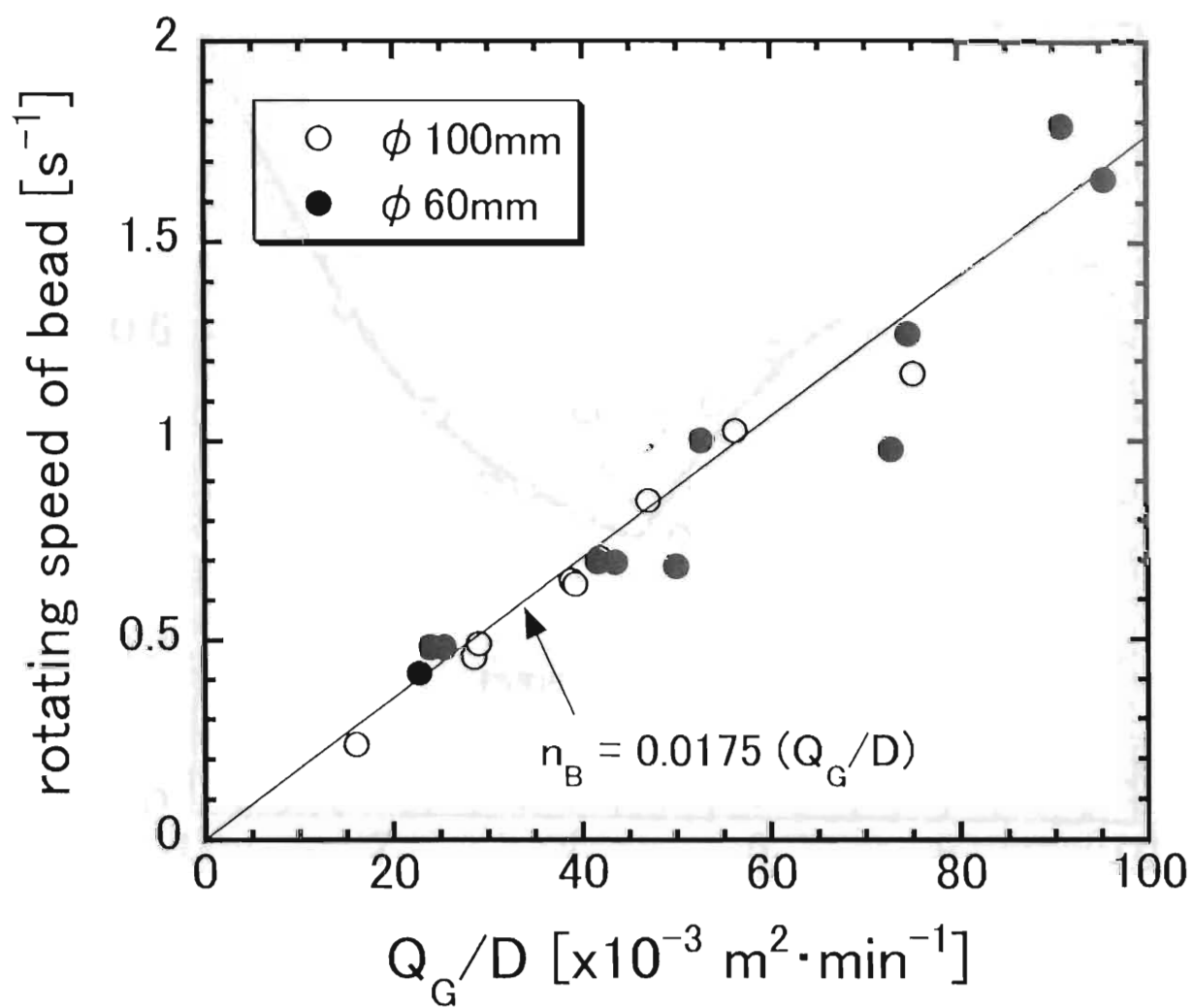


Fig.7-4 Correlation of rotating speed of bead by (Q_G/D)

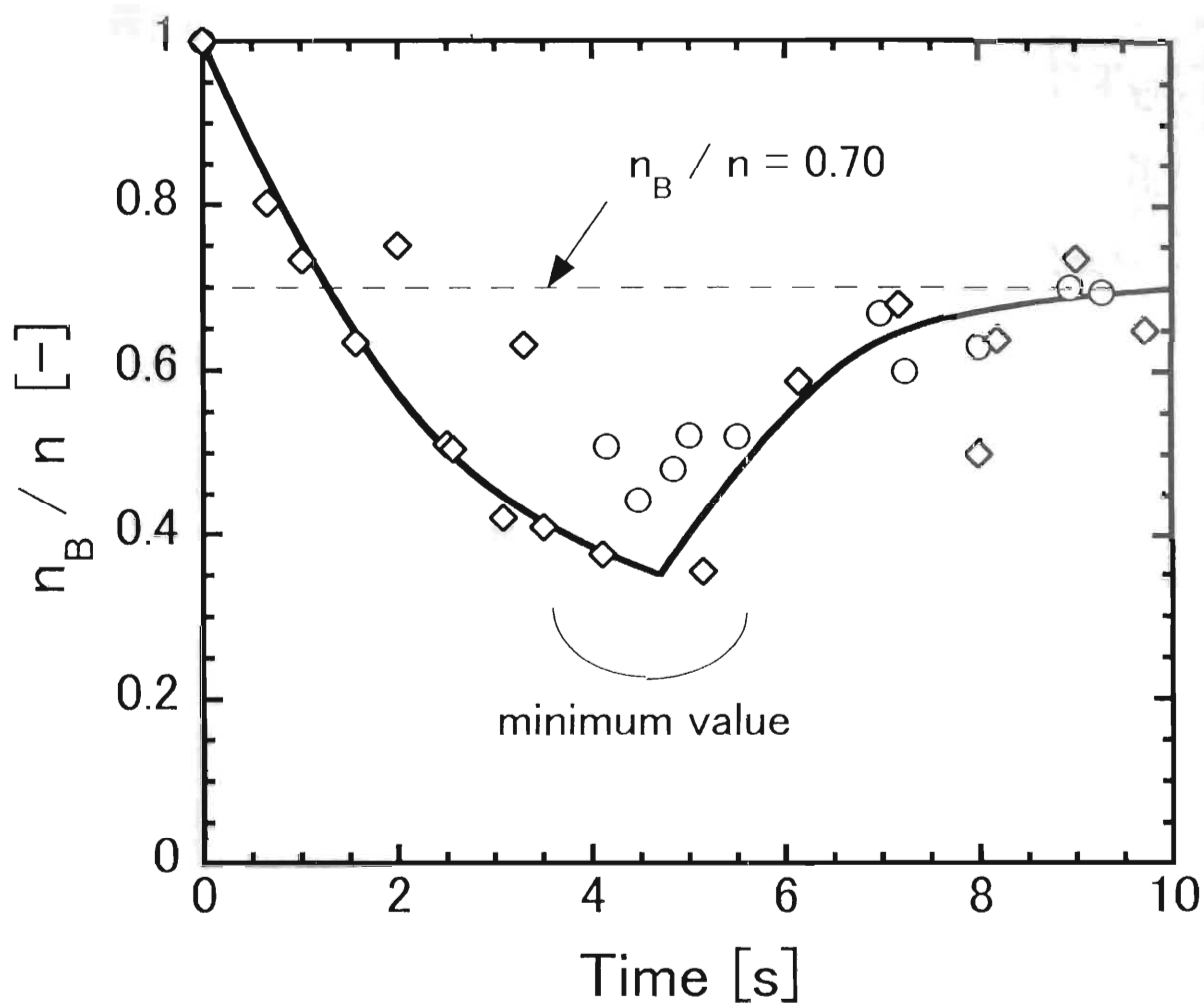


Fig.7-5 Rotating speed of bead in rotating vessel under microgravity

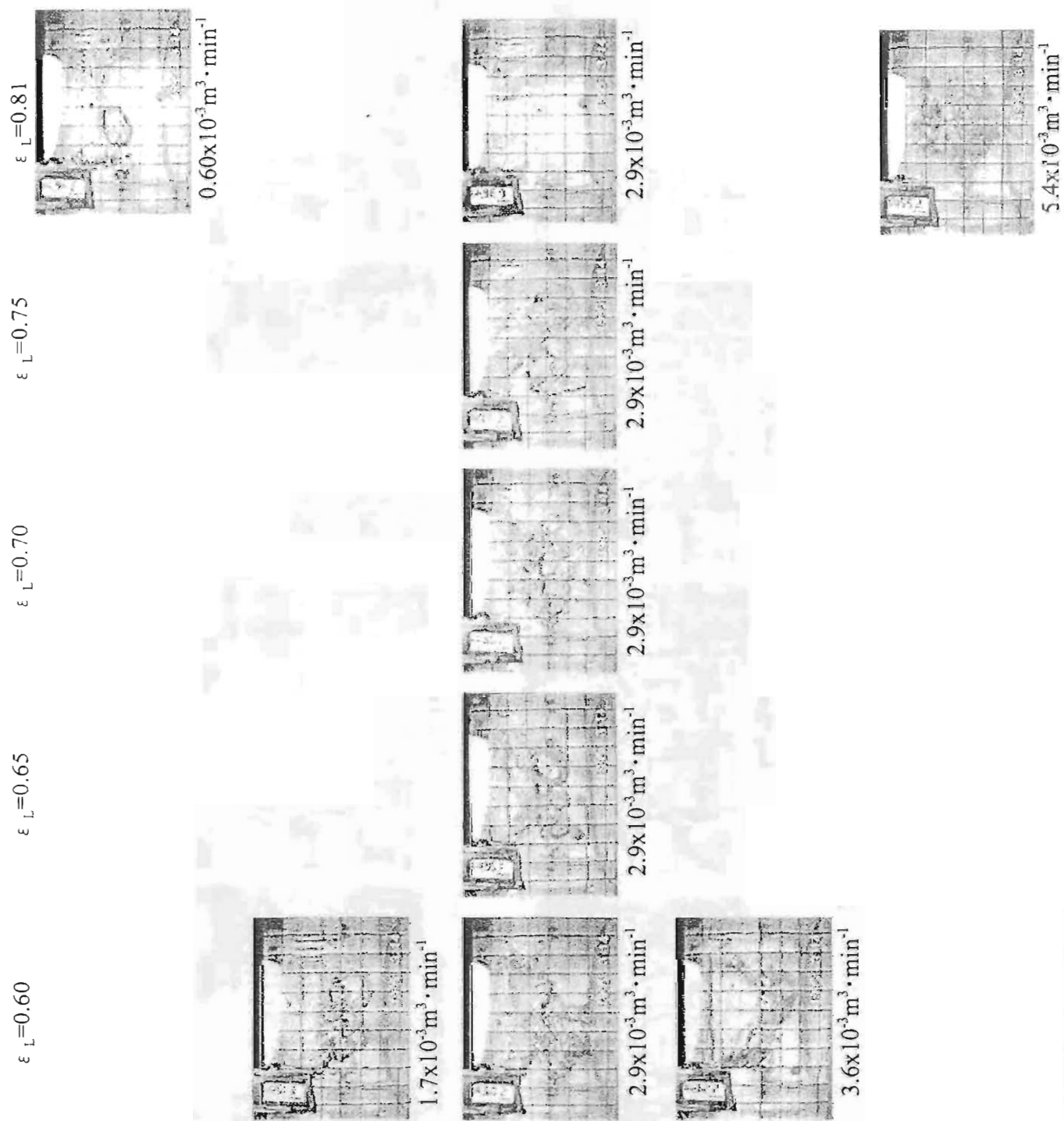


Fig. 7 Effect of gas flow rate and the volume ratio of water/vessel on air-water hollow flow ($k=1$ 33c) HNTPI

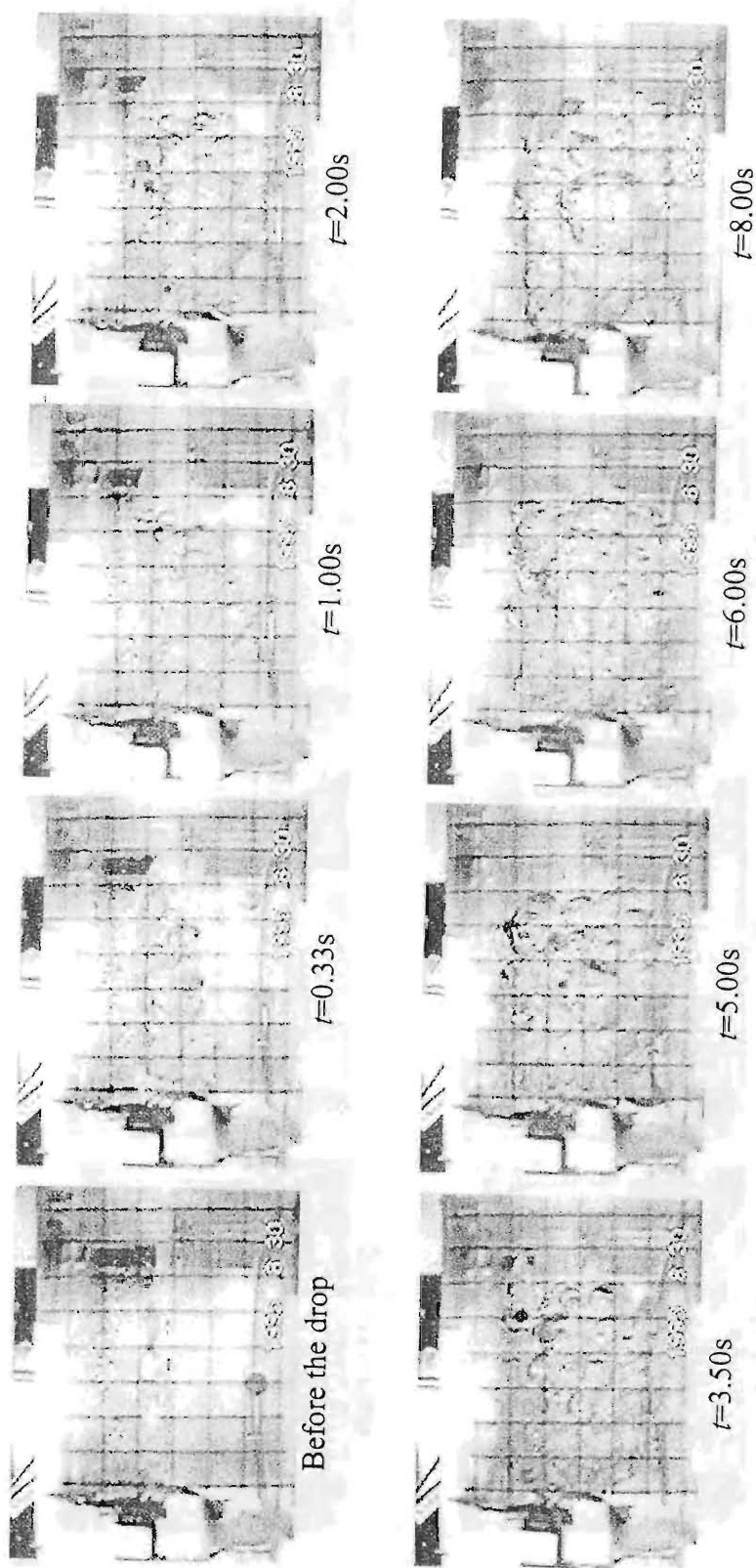


Fig.7-7 Air-water hollow profile produced by air inlet energy at various drop times
 $Q_g=2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, $D=0.10 \text{ m}$, $\varepsilon_L=0.60$

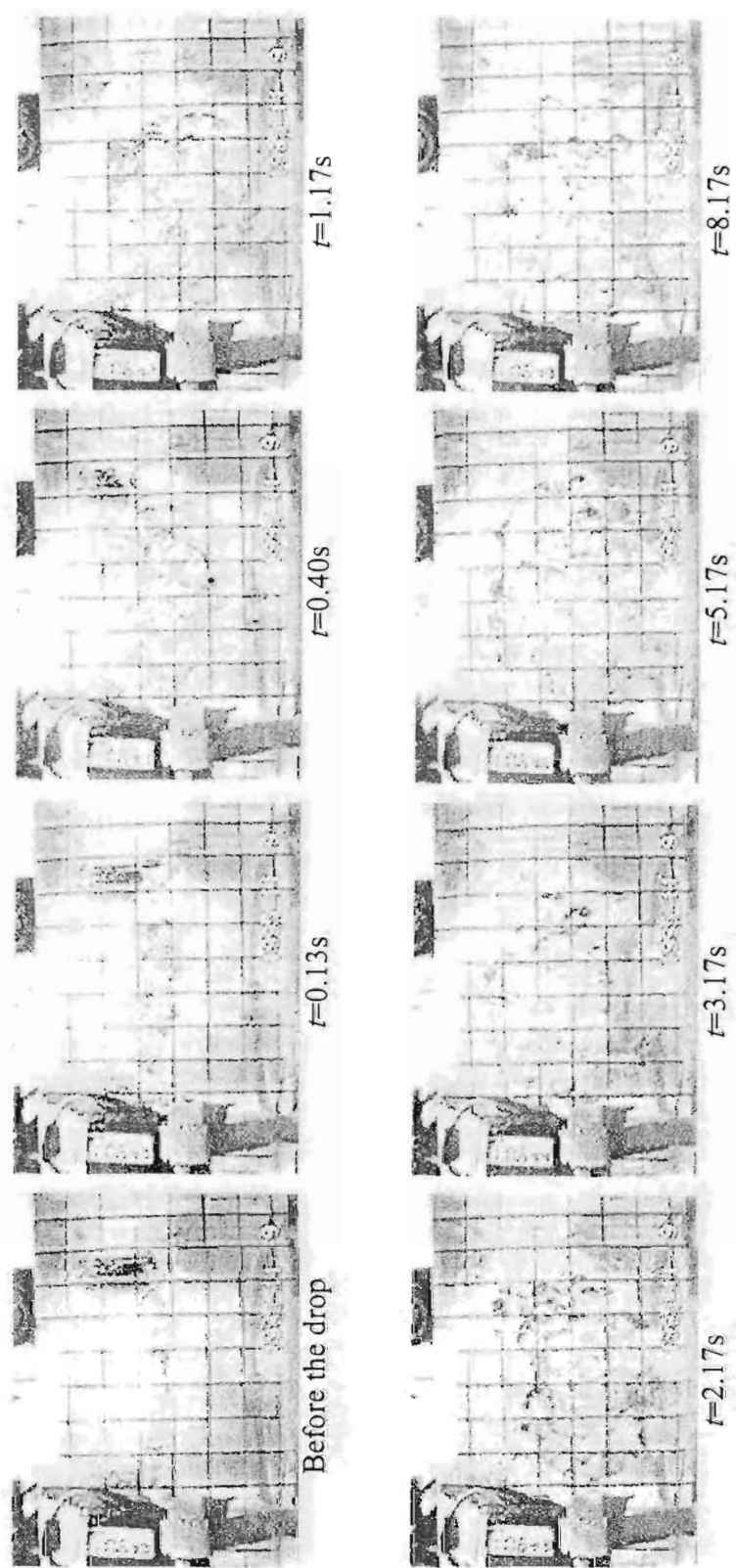


Fig.7-8 Air-water hollow profile produced by air inlet energy at various drop times
 $Q_g = 3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, $D = 0.10 \text{ m}$, $\varepsilon_L = 0.60$

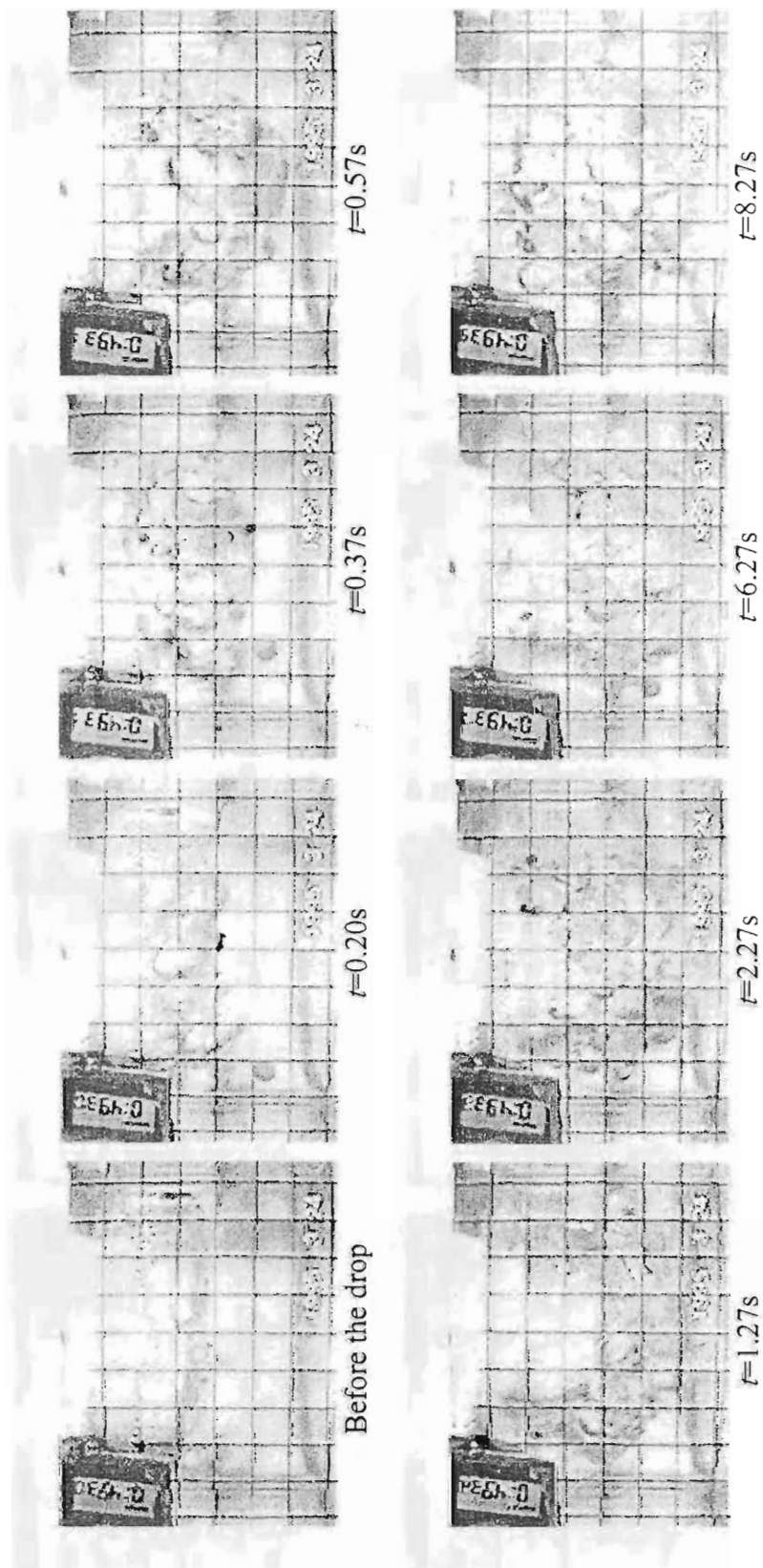


Fig.7-9 Air-water hollow profile produced by air inlet energy at various drop times
 $Q_g = 4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, $D = 0.10 \text{ m}$, $\varepsilon_L = 0.60$

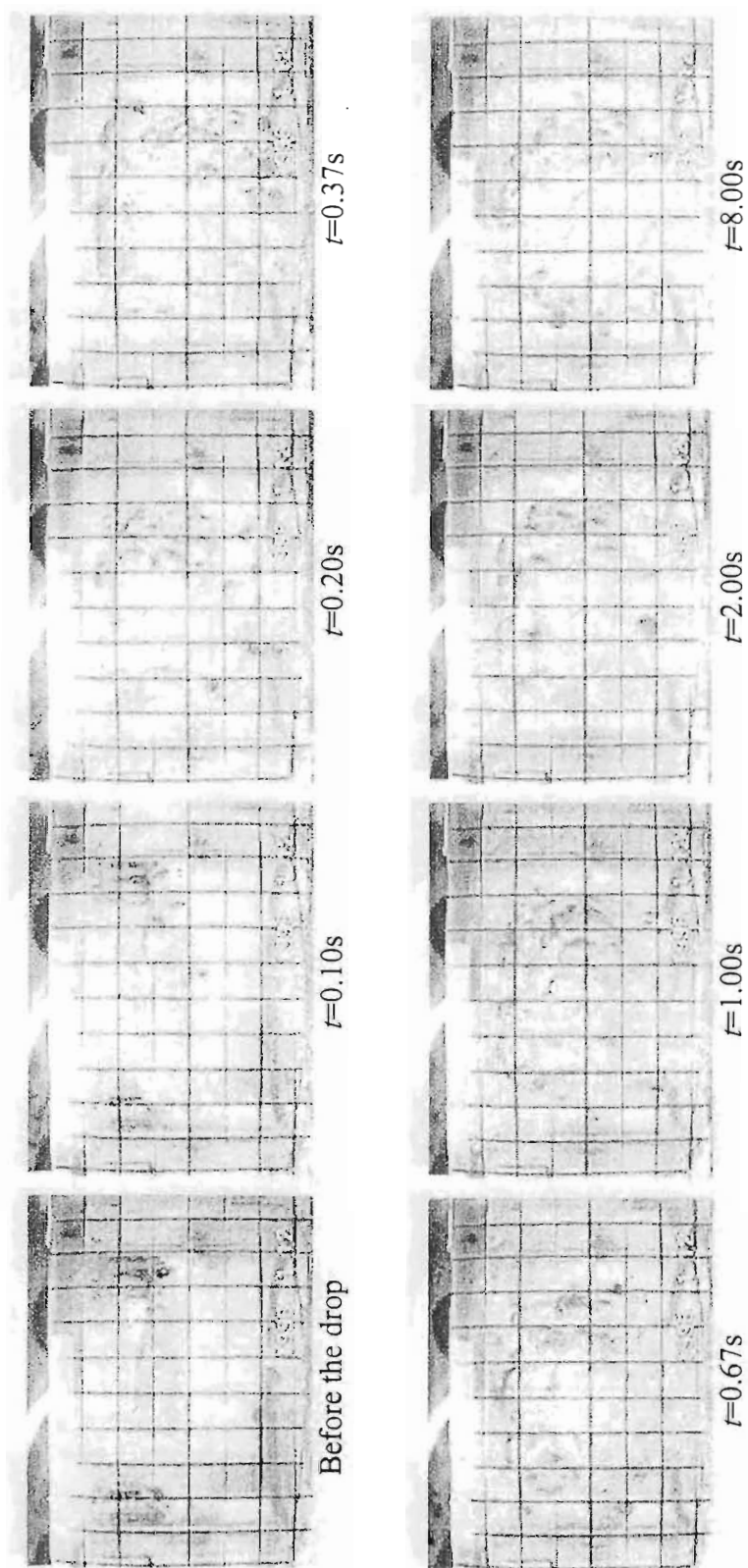


Fig.7-10 Air-water hollow profile produced by air inlet energy at various drop times
 $Q_g=6.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, $D=0.10 \text{ m}$, $\varepsilon_L=0.60$

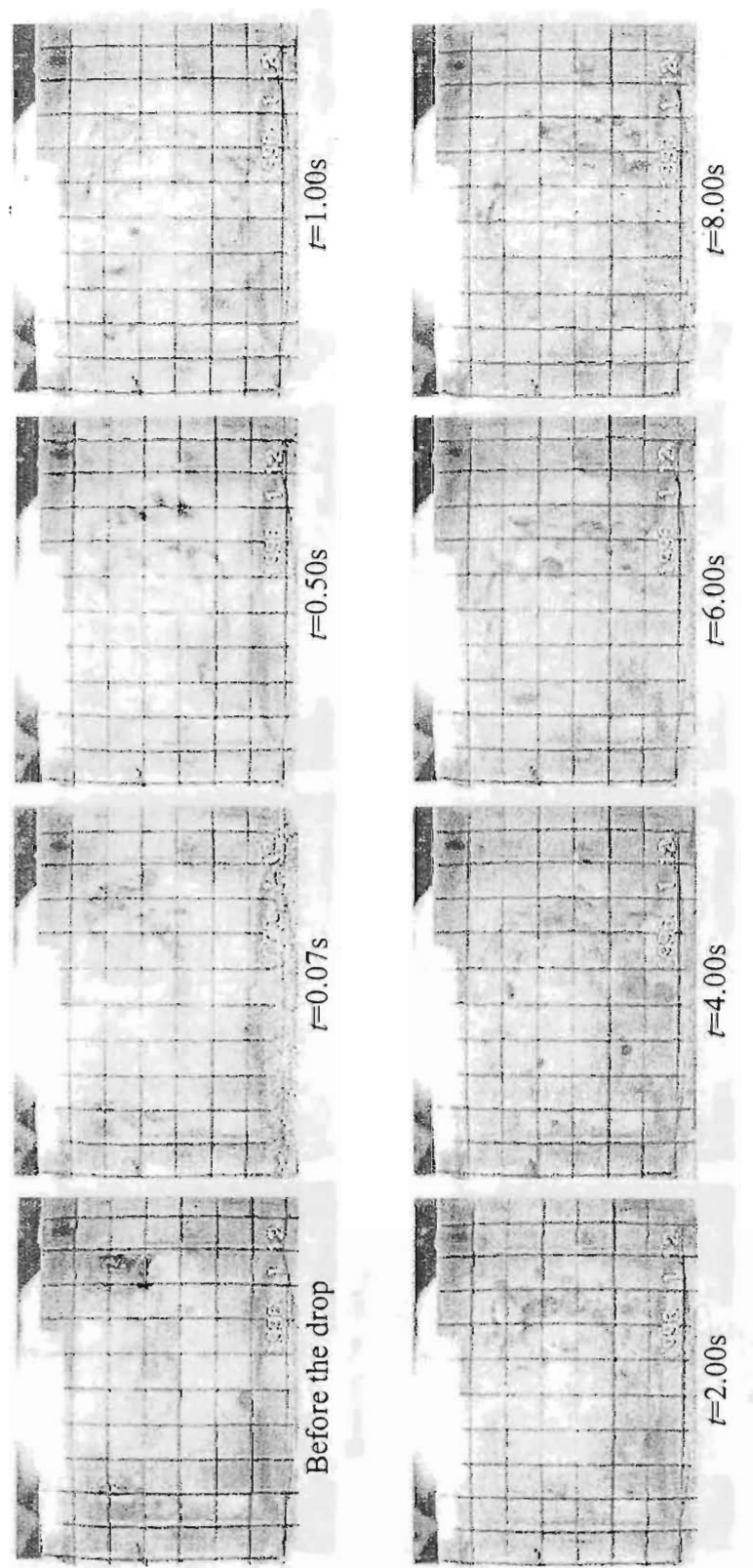


Fig.7-11 Air-water hollow profile produced by air inlet energy at various drop times
 $Q_g = 7.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, $D = 0.10 \text{ m}$, $\epsilon_L = 0.60$

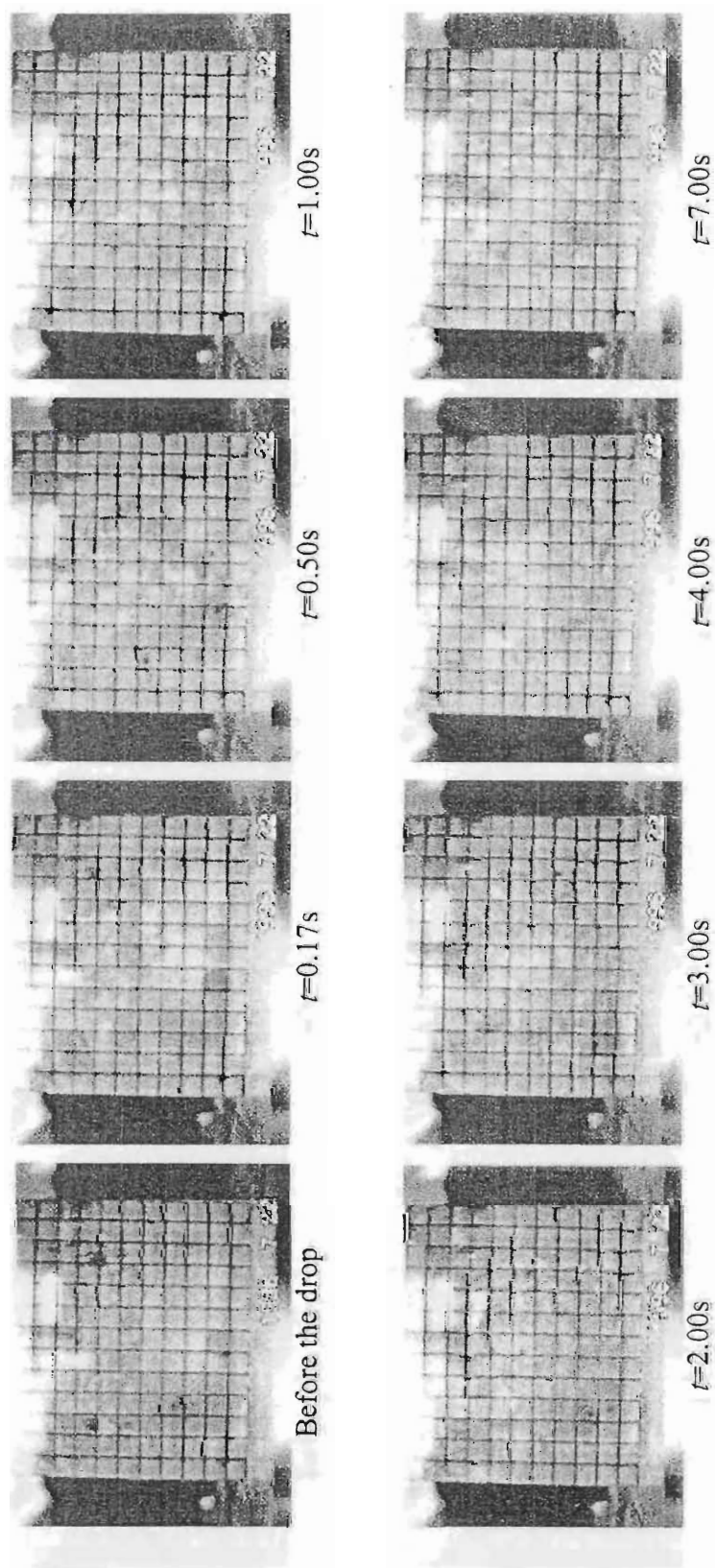


Fig. 7-12 Air-water hollow profile produced by air inlet energy at various drop times
 $Q_g = 2.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, $D = 0.060 \text{ m}$, $\epsilon_L = 0.60$

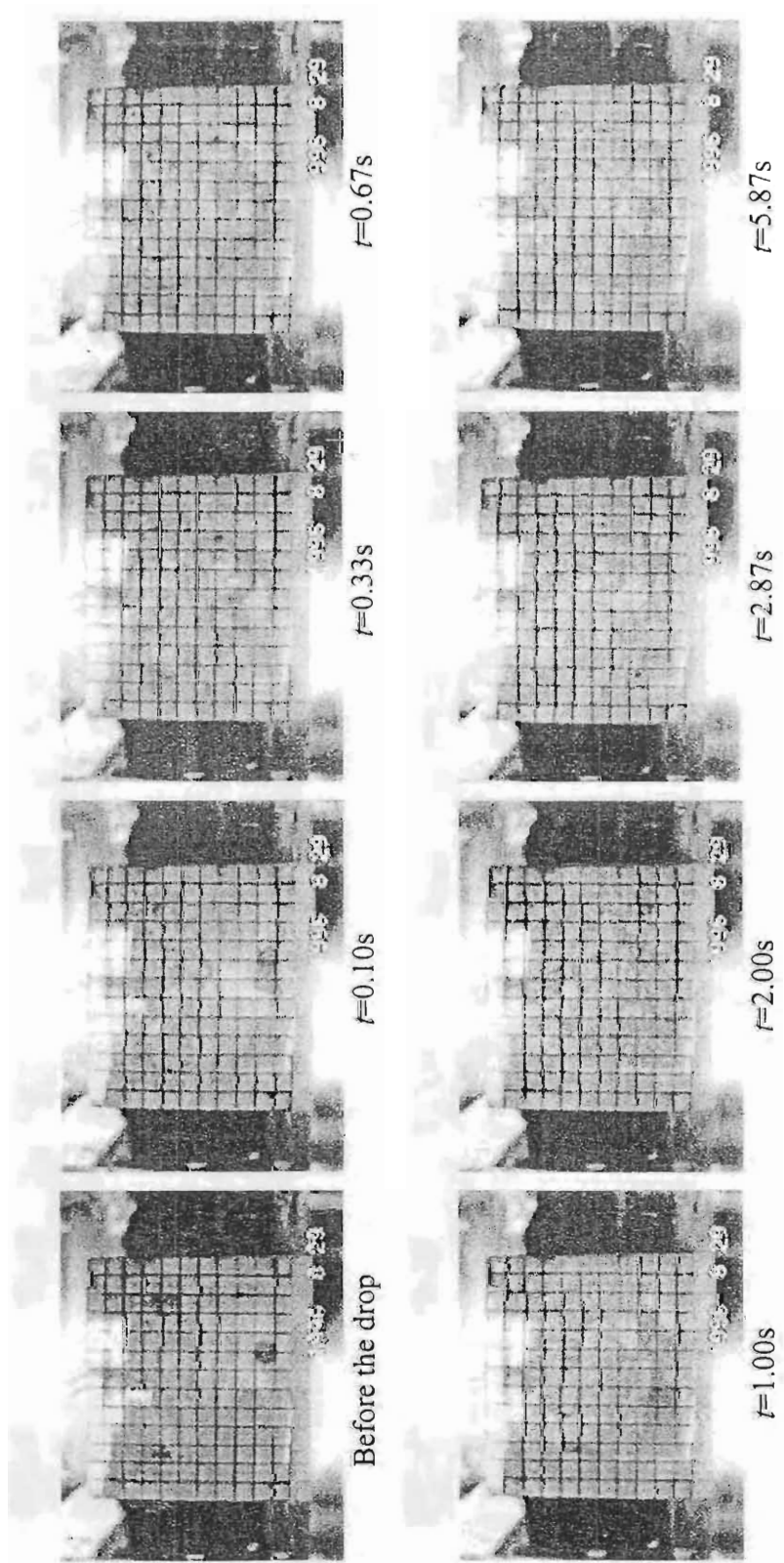


Fig.7-13 Air-water hollow profile produced by air inlet energy at various drop times
 $Q_g = 4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, $D = 0.060 \text{ m}$, $\varepsilon_L = 0.60$

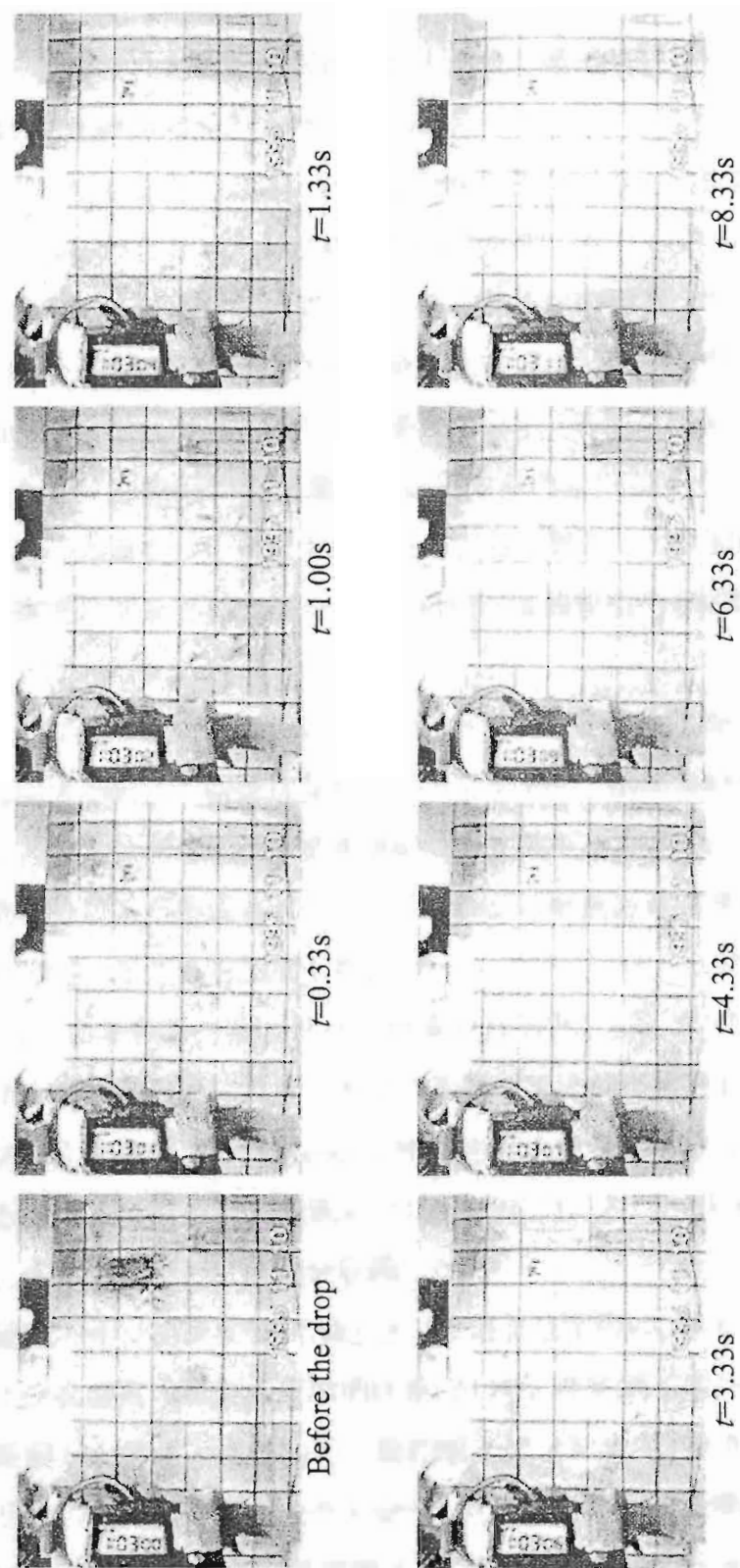


Fig.7-14 Air-standard medium hollow profile produced by air inlet energy at various drop times
 $Q_g=4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, $D=0.10 \text{ m}$, $\epsilon_L=0.60$

第8章 総括

宇宙ステーションなどの閉鎖系微小重力環境で藍藻スピルリナを培養し、その光合成能を利用して酸素供給を行うための基本データとして、地上1Gにおいてスピルリナの培養条件、周期光を用いることによる酸素発生速度の向上を実験的に検討した。また、地上1Gで得られたスピルリナの培養結果を微小重力下で実現するため、重力の代わりに遠心力を系に与えるタイプの微小重力環境用培養器を考案し、培養器を設計するために必要な基本的データである、微小重力下における気液界面形状の制御法、気泡挙動について検討した。これらの結果を踏まえ、容器を回転させることにより遠心力場をつくりだす容器回転型培養器と固定容器内に供給するガスの通気エネルギーを利用して遠心力場をつくりだす通気型培養器を試作し、中空回転液層の形成に及ぼす容器回転速度や液量率、液物性など操作特性、容器規模や容器縦横比など設計因子の影響について検討した。

第1章では、閉鎖系生命維持システム、微細藻類を用いた酸素供給、微小重力環境用培養器に関する既往の研究成果について紹介した。微細藻類の光合成能を利用した酸素供給システムは概念的な研究が多いこと、微小重力下では表面張力が最大の力となるため気液分散系が形成されにくく、これが微小重力環境用培養器の開発を行う際の障害となっていることを指摘した。

第2章では、微細藻類スピルリナの培養を目的として、まず、基本的なデータであるスピルリナの増殖速度に及ぼす照度の影響を実験的に検討した。その結果、スピルリナの増殖は光を基質としたMonod型増殖速度式で表現することができ、基本パラメータである標準培養液の吸光係数 $A(=110\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1})$ 、スピルリナの最大比増殖速度 $\mu_m(=2.6\text{d}^{-1})$ 、飽和定数 $K_L(=8.3\text{klx})$ を取得した。

次に亜硝酸イオン初濃度 $0.0\text{--}1.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ の培養液を用い、スピルリナの増殖に及ぼす亜硝酸イオン初濃度の影響を実験的に検討した。亜硝酸イオンを添加していない標準培養液で培養した結果と比較して、亜硝酸イオン初濃度が約 $0.8\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下の場合ではスピルリナの比増殖速度が大きくなり、亜硝酸イオン初濃度 $0.3\text{--}0.4\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 付近で比増殖速度は約1.3倍になった。亜硝酸イオン初濃度が約 $0.8\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上の場合、亜硝酸イオンによりスピルリナの増殖が阻害され、比増殖速度は低下することを示した。

また、長期間培養したスピルリナ懸濁液中に発生する直線状藻の除去、及びスピル

リナに対する磁気暴露実験を行った。初発 CaCl_2 濃度を標準培養液の0.32倍とし、かつ、直線増殖期の後期以降の種母スピルリナを植種することにより、長期間培養により発生した直線状藻をスピルリナ懸濁液中から沈澱除去できることがわかった。続いて行った、ネオジム磁石による磁場暴露実験で、スピルリナの形状がらせん状から直線状に変化することが確認され、直線状藻の発生因子が周辺機器類から発生する磁場である可能性を示した。

第3章では、微細藻類スピルリナによる炭酸固定・酸素供給を目的として、光照射後、光を遮断してスピルリナの比呼吸速度 Q の経時変化に及ぼす入射光照度 I_0 及び光照射時間 t_L の影響を実験的に検討した。その結果、比呼吸速度 Q は遮光直後より約15-30分間一定値 Q_1 を保ち、その後急激に減少し、遮光後30分以上経過すると再び一定値 Q_2 となり、 Q_2 は一般的に用いられている長時間暗条件下での比呼吸速度 Q_0 と一致するものの、 Q_1 は Q_0 よりも1桁大きいオーダーとなることを示した。また、遮光直後の比呼吸速度 Q_1 は遮光前の光照射時間 t_L に依存しないが、入射光照度 I_0 の増加に伴い増加し、 Q_1 の照度依存性はMonod型速度式で表すことができることを示した。

次に、回転円盤型スリットを用いてスピルリナ懸濁液に周期光を照射し、スピルリナの酸素発生量に及ぼす周期数 N 、1周期あたりの光照射時間 t_L 及び遮光時間 t_D の影響を実験的に検討した。本実験範囲の周期光を照射すると単位時間当たりの周期数 N の増加に伴い、酸素発生量比 r は増加した。酸素発生量比 r が1以上となる周期数 N は遮光・照射時間比 t_D/t_L によって異なるが、 r の値が1以上となる1周期あたりの光照射時間 t_L は t_D/t_L の値に関係なく約1秒以下である。 t_L が1秒より小さい条件では t_D が大きくなると r の値が大きくなった。これらの実験結果は周期光照射中のスピルリナの酸素発生速度と呼吸速度の経時変化の簡明なモデルにより定性的に説明できた。

第4章では、地上1Gで得られた結果を微小重力環境で実現するための培養環境として、容器を回転させることにより系内に遠心力を発生させるタイプの培養系を考案した。回転容器内の水-空気系の気液界面形状を微小重力実験によって観察・記録した結果、微小重力下では回転容器内の気液界面形状は直ちに变化し、約5秒後にほぼ一定の形状となり、実験終了までその形状を維持された。また、落下直後に気液界面と底面が接触しない場合、その後も接触しないことが明らかとなった。液量率0.87以下の場合、Leslieら(1985)のモデル式による計算結果からは上下左右対称の気液界面曲線が得られると予想されたが、液量率0.81で微小重力実験を行った結果、回転容器底面に

気固接触面が形成されなかった。ステンレス鋼軸をPTFEによって被覆し、濡れ性を变化させたところ、未被覆の場合に比べて気液界面が底面に接近した。液量率を0.60に減少させた場合について微小重力実験を行ったところ、約1秒後に気液界面は底面と接触した。落下から約6秒後に円筒容器底面に空気とPTFEの接触面が形成され、左右対称、上下非対称ではあるが、目的とする培養環境に適した気液界面形状を形成させることができた。さらに、軸を取り除いた容器を用いた場合、気液界面形状はLeslieら(1985)のモデル式による計算結果と若干異なる結果が得られたが、軸をPTFE被覆した場合と同様、目的とする培養環境に適した気液界面形状を形成させることができた。

第5章では、回転容器内の水-液体系の気液界面形状を微小重力下で観察し、中空回転液層の形成に及ぼす容器回転速度、液量率、液物性、容器縦横比、容器内径の影響を実験的に検討した。まず、第4章の微小重力実験の結果を基に中空回転液層形成の可否を判定するための基準を作成した。液量率0.60の場合、中空回転液層形成の可否に及ぼす修正Reynolds数の影響は見られないこと、修正Weber数が2.2を越えると中空回転液層形成が可能であることがわかった。また、水を用いて形成不可能であった条件で表面張力が水の約半分である $5\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ドデシル硫酸ナトリウム水溶液を使用したところ、中空回転液層の形成が可能であった。従って、形成可否判定に修正Weber数を使用することの妥当性が確認された。一方で、Leslieら(1985)のモデル式から形成可能と予測された実験条件の中に中空回転液層の形成が不可能な実験条件が存在し、Leslieらのモデル式はアクリル樹脂製容器内の水-空気系に対して適用できないことがわかった。修正Weber数と液量率の関係を調べたところ、本実験系における中空回転液層形成の可否領域を明確に分ける境界線が得られた。この境界線とLeslieら(1985)のモデル式から得られる境界線を組み合わせることにより、アクリル樹脂製容器内の水-空気系に対して中空回転液層の形成可否判定を行うことができた。容器縦横比を一定として容器内径を変化させた場合、中空回転液層の形成に及ぼす容器規模の影響は見られなかった。また、容器縦横比を変化させた場合についても実験的検討を加え、微小重力下における中空回転液層の形成可否に及ぼす容器縦横比の影響を明らかにした。上記結果を基に、これまでに行った全微小重力実験における中空回転液層の形成可否を表す分割線を得た。

第6章では、微小重力環境下で形成させた中空回転液層の気液界面上に気泡が接触してから破裂するまでの様子を水-空気系で観察し、微小重力環境用培養器の気液接

触操作を円滑に行うための操作指針である気泡破裂時間を測定し、地上1Gの場合と比較した。地上1Gでは平均気泡破裂時間は液粘度に関係なくほぼ一定であることがわかった。また、微小重力下の遠心力場では、液体中の気泡に作用する遠心加速度が小さくなると平均気泡破裂時間は大きくなることがわかった。気泡破裂時間は上昇気泡の持つ運動エネルギーではなく、気液界面と気泡が接触した後の因子により決まることがわかった。

第7章では、固定容器の容器壁に設置したノズルからガスを吹き込み、容器内の気液流動状態を微小重力下で観察し、ガスの通気エネルギーを利用して遠心力を発生させた。容器内の気液流動状態を微小重力下で観察し、内径100mm、高さ65mmの容器を液量率0.60で操作した場合、最適ガス流量は $4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ であることを示した。また、容器規模の影響を検討した結果、第5章で示した中空回転液層の形成判別式で形成可否を推測することができた。スピルリナ培養用の標準培養液を使用した場合、培養液中に微細気泡が多く蓄積し、水系と同様の取り扱いができないことがわかった。

本研究で明らかにした最も重要な点は地上1Gにおける培養技術をほとんどそのまま移行できる気液流動系を微小重力環境下でつくり出したことである。微小重力環境下において気液流動系を形成させることができるようになったことにより、培養器を始め各種気液接触器の開発が加速度的に進むものと期待される。

今回行った実験は水-空気系を主としており、今後スピルリナの培養を行うには、スピルリナ培養液-空気系や懸濁液-空気系などで気泡破裂時間の測定や中空回転液層の形成についてさらにデータを蓄積する必要があると思われる。また、地上1Gにおいて微小重力実験を行うことのできる時間は、落下塔を用いた場合で最長10秒、航空機を用いた場合で約20秒と非常に短い。本報において地上1Gの培養技術が移行しやすい系の形成が可能であることを示したが、実用化を行うためにはスペースシャトル等を利用した長期間にわたる微小重力環境下での培養実験を行い検証する必要がある。

Nomenclature

A	= absorption coefficient	$[m^2 \cdot kg^{-1}]$
B_{max}	= maximum magnetic field	$[T]$
d	= cylindrical gas diameter	$[m]$
D	= vessel diameter	$[m]$
d_B	= diameter of bubble	$[m]$
g	= gravitational acceleration	$[m \cdot s^{-2}]$
g_0	= standard gravitational acceleration	$[m \cdot s^{-2}]$
H	= vessel height	$[m]$
I	= light intensity	$[klx]$
I_{10}	= $(I_0 - I_B) / \ln(I_0 / I_B)$	$[klx]$
K	= saturation constant	$[klx]$
k_L	= oxygen production rate	$[kmol \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}]$
K_L	= average oxygen production rate	$[kmol \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}]$
L	= suspension depth	$[m]$
m	= opening number	$[-]$
N	= periodicity	$[s^{-1}]$
n	= unit normal pointing outward from the surface	$[-]$
n	= rotating speed of vessel	$[s^{-1}]$
n_L	= number of linear algae	$[-]$
n_S	= number of <i>S. platensis</i>	$[-]$
$[NO_2^-]$	= nitrite concentration	$[kg \cdot m^{-3}]$
$[NO_3^-]$	= nitrate concentration	$[kg \cdot m^{-3}]$
P	= pressure	$[hPa]$
Q	= flow rate	$[m^3 \cdot min^{-1}]$
Q	= specific respiration rate	$[kmol \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}]$
Q_0	= specific respiration rate (0-15min after shading light)	$[kmol \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}]$
Q_1	= specific respiration rate (30-60min after shading light)	$[kmol \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}]$
r	= $V_p / \alpha V_c$	$[-]$
r	= radius	$[m]$

r_0	= radius of gas-solid contact area	[m]
r	= r/R	[-]
r_0	= r_0/R	[-]
R	= the ratio of initial CaCl_2 concentrations in a standard medium	[-]
R	= maximum radius of gas phase	[m]
Re	= Reynolds number ($= d_B^2 n \rho / \mu$)	[-]
Re	= modified Reynolds number ($= d^2 n \rho / \mu$)	[-]
R_s	= $n_s / (n_s + n_l)$	[-]
t	= time	[d] or [s]
t_B	= bubble break time	[s]
T	= temperature	[K]
V	= oxygen volume	[m ³]
V_s	= volume of <i>S. platensis</i> suspension	[m ³]
V_l	= liquid volume	[m ³]
V_v	= vessel volume with shaft	[m ³]
V_r	= vessel volume without shaft	[m ³]
We	= $\rho n^2 D^3 / \sigma$	[-]
We'	= $\rho n^2 d^3 / \sigma$	[-]
We^*	= $\rho \omega^2 R^3 / 8 \sigma$	[-]
X	= algal concentration	[kg · m ⁻³]
z	= axial coordinate	[m]
z	= z/R	[-]
α	= $t_l / (t_B + t_l)$	[-]
Δt	= apparent time	[s]
ε	= absorption coefficient	[m ² · kg]
ε_l	= volume ratio of liquid/vessel	[-]
θ	= contact angle	[-]
μ	= viscosity	[mPa · s]
μ	= specific growth rate	[s ⁻¹]
μ_m	= maximum specific growth rate	[s ⁻¹]

ρ	= $\rho_l - \rho_g$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_l	= liquid density	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_g	= gas density	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
σ	= surface tension	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$
τ_B	= mean bubble break time	$[\text{s}]$
ω	= angular velocity	$[\text{s}^{-1}]$
σ	= surface tension	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$
ϕ	= dz/dr	$[-]$
ψ	= integral parameter	$[-]$
ω	= angular velocity	$[\text{s}^{-1}]$

<subscript>

0	= initial or inlet or 0klx
1	= 0-15 min(t_D)
2	= 30-60 min(t_D)
a	= advancing
B	= bottom or bubble
c	= continuous
D	= dark period
G	= gas
L	= light period
M	= medium
max	= maximum
p	= periodical
P	= pressure
r	= receding
T	= temperature
W	= water bath
x	= x-direction
y	= y-direction
z	= z-direction
∞	= infinity

Literature Cited

- Akimoto M., T.Ohara, K.Ohtaguchi and K.Koide; "Carbon Dioxide Fixation α -Linolenic Acid Production by the Hot-Spring Alga *Cyanidium caldarium*," *J.Chem.Eng.Japan*, **27**, 329-333 (1994)
- Baranowski J.D., C.A.Dominguez and P.C.Magarelli; "Effects of Drying on Selected Qualities of *Spirulina platensis* Protein," *J.Agric.Food Chem.*, **32**,1385-1387(1984)
- Bourrelly:Les algues d'iaou douce,(Editions N. Boubee & Cie),p.438,Paris,France(1970)
- Camacho-Rubio F. and M.E.Martinez-Sancho; "Development of a model for the effect of the intensity of light on the growth of *Chlorella pyrenoidosa*," *Intern.Chem.Eng.*,**25**,289-294(1985)
- Castens D.J. and A.F.Rozich; "Analysis of Batch Nitrification Using Substrate Inhibition Kinetics," *Biotechnol.Bioeng.*,**28**,461-465(1986)
- Charles G.E. and S.G.Mason;*J.Colloid Sci.*,**16**,186(1960)
- Clement C., D.Lonchamp, M.Rebeller and H.V.Landeghem; "The Development of *Spirulina* Algae Cultivation,"*Chem.Eng.Sci.*,**35**,119-126(1980)
- Conn E.E., P.K.Stumpf, G.Bruening and R.H.Doi; Seikagaku, 5th Ed.,454-455, Tokyo Kagaku Dojin, Tokyo, Japan (1988)
- Dekker A.,K.Reitsma,T.Beugeling,A.Bantjes,J.Feijen and W.G. van Aken; "Adhesion of Endothelial Cells and Adsorption of Serum Proteins on Gas Plasma-Treated Polytetrafluoroethylene," *Biomaterials*,**12**,130-138(1991)
- Devi M.A., G.Subbulakshmi, K.M.Devi and L.V.Venkataraman; "Studies on the Proteins of Mass-Cultivated, Blue-Green Alga (*Spirulina platensis*)," *J.Agric.Food Chem.*,**29**,522-525(1981)
- Duxbury D.D.; "Spirulina Blue-Green Algae Offers Health Benefits of High Protein and Vitamins," *Food Processing*,**13**,50-52(1989)
- Fiorani M., O.Cantoni, P.Sestili, R.Conti, P.Nicoloni, F.Vetrano and M.Dacha; "Electric and/or Magnetic Field Effects on DNA structure and Function in Cultured Human Cells," *Mutation Research*, **282**, 25-29(1992)
- Gee C.S., M.T.Suidan and J.T.Pfeffer; "Modering of Nitrification under Substrate-Inhibiting Conditions," *J.Environ.Eng.*,**116**,18-31(1990)
- Gillispie T and E.K. Rideal;*Trans. Farady Soc.*,**52**,173(1956)
- Hirano M., A.Ohta and K.Abe; "Magnetic Field Effects on Photosynthesis and Growth of the Cyanobacterium *Spirulina platensis*," *J.Ferment.Bioeng.*,**86**,313-316(1998)
- Huang S-Y. and C-P.Chen; "Growth Kinetics and Cultivation of *Spirulina platensis*," *J.Chin. Inst. Eng.*, **9**,355-363(1986)
- 今堀和友,山川民夫;生化学辞典(第2版),p.162,東京化学同人(1990)
- 川原富貴,松下琢,隈本正一郎,船津和守;"オンラインレーザ濁度計を用いたエアリフト槽におけるクロレラ細胞高密度連続培養に関する研究"化学工学会第60年会研究発表講演要旨集,p.228(1995)
- Kobayashi K. and K.Fujita; "Cultivation of *Spirulina platensis* and its Growth Behavior Controlling Cultivation Medium," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*,**22**,56-59(1996)
- Kobayashi K. and K.Fujita; "Tube Diameter on Tubular Photobioreactor for Microalgal Culture and its Biomass Productivity," *J.Chem.Eng.Japan*,**30**,339-341(1997)
- Kubo R., S.Nagakura, H.Iguchi and H.Ezawa eds; Rikagaku Jiten 4th, p.781-783, Iwanami Shoten, Tokyo, Japan(1987)
- 黒川秀昭,船橋清美,菅原敏,二俣亮介;"膜蒸留技術を用いた宇宙洋尿処理装置の基礎検討,"化学工学会第28回秋季大会,p.82(1995)
- Heathcote D.G., D.K.Chapman, A.H.Brown and R.F.Lewis; "The Gravitational Plant Physiology Facility-Description of Equipment Developed for Biological Research in Spacelab," *Microgravity Sci.Technol.*,**7**,270-275(1994)
- Hieke B. and E.Neef; "The Rate-Limiting Step of DCPIP Photoreduction by Isolated Chloroplasts of Different Plant Species, Characterized by Measurements Under Intermittent Irradiation with Variable Flash and Dark Interval," *Photosynthetica*, **23**, 524-536(1989)
- Hoshino K., M.Hamochi, S.Mitsubishi and K.Tanishita; "Measurement of Oxygen Production Rate

- in Flowing *Spirulina platensis*," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **35**, 89-93(1991)
- 細野英之, 長棟輝行, 遠藤勲, 下村法子, 名取正彦; "培養温度変化、周期光照射がクロレラの増殖及び糖蓄積に及ぼす影響," 化学工学会第 26 会秋季大会研究発表講演要旨集, p.356(1993)
- Huang S-Y. and C-P.Chen; "Growth Kinetics and Cultivation of *Spirulina platensis*," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, **9**, 355-363(1986)
- Hung R.J., Y.D.Tsao, B.B.Hong and F.W.Leslie; "Dynamical Behavior of Surface Tension on Rotating Fluids in Low and Microgravity Environment," *Appl. Microgravity Tech.*, **2**, 81-95 (1989a)
- Hung R.J., Y.D.Tsao, B.B.Hong and F.W.Leslie; "Axisymmetric Bubble Profiles in a Slowly Rotating Helium Dewar under Low and Microgravity Environments," *Acta. Astronautica*, **19**, 411-426(1989b)
- Imahori K. and T.Yamakawa; *Seikagaku Jiten*, 2nd Ed., p.458, Tokyo Kagaku Dojin, Tokyo, Japan (1990)
- Imai R. and T.Yano; "A Study of Bubble Separation Utilizing Centrifugal Force under a Reduced Gravity Condition," *Nihon Kikaigakkai Ronbunshu*, **63**, 36-42(1997)
- Japan Microgravity Center; "JAMIC User's Guide," Japan Microgravity Center, I-19, Sapporo, Japan(1995)
- Jayawardena S.S., V.Balakotaiah and L.C.Witte; "Flow Pattern Transition Maps for Microgravity Two-Phase Flows," *AIChE J.*, **43**, 1637-1640(1997)
- Jeffreys G.V. and J.L.Hawksley; *J.Appl. Chem.*, **12**, 329(1962)
- Jeffreys G.V. and J.L.Hawksley; *AIChE J.*, **43**, 294(1965)
- Johnson S.R., G.G.Garrard and S.M.Mitchell; "Multifunctional Air Revitalization Systems; Combined CO₂-Trace Contaminant Removal Using Solid Amines," *Proc.Space Congr.*, 30, 42-55, Florida, USA(1993)
- Kim I., Y.Kamotani and S.Ostrach; "Moderating Bubble and Drop Formation in Flowing Liquids in Microgravity," *AIChE J.*, **40**, 19-28(1994)
- Kondo T. and S.Suzuki; *Yasashii Koroido to Kaimen no Kagaku*, 2nd Ed., p.84, Sankyo Shuppan, Tokyo, Japan(1992)
- Kok B.; Experiments on Photosynthesis by *Chlorella* in Flashing Light. In: *Algal Culture from Laboratory to Pilot Plant.*, Burlew J.S.ed., p.63-75, Carnegie Institution of Washington, D.C., USA (1953)
- Lee H.Y., L.E.Erickson and S.S.Yang; "Kinetics and Bioenergetic of Light-Limited Photoautotrophic Growth of *Spirulina platensis*," *Biotechnol. Bioeng.*, **29**, 832-843(1987)
- Leslie F., R.F.Gans and C.Schafer; "Fluid Surface Behavior in Low Gravity," NASA Technical Paper 2486, Marshall Space Flight Center, Alabama, USA(1985)
- Lin S.F., K.S.Chen and Y.Ikeda; "Surface-graft Polymerization of Water-Soluble Monomers on Inorganic Substrates," *Polymer Preprints Japan*, **42**, 593(1993)
- Madueno F., E.Flores and M.G.Guerrero; "Competition between Nitrate and Nitrite Uptake in the Cyanobacterium *Anacystis nidulans*," *Biochim. Biophys. Acta.*, **896**, 109-112(1987)
- Matsumoto H., A.Hamasaki, N.Shioji and Y.Kita; "Fundamental Study of Small Closed Life Support System Utilizing an Artificial Gill," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **18**, 584-592(1992)
- Matsumoto H. and A. Hamasaki; "A Simple Method of Measuring Oxygen Production and Consumption Rates of *Chlorella* and its Application," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **18**, 763-766 (1992)
- Matsumoto H., A.Hamasaki, N.Shioji and Y.Ikuta; "Influence of CO₂, SO₂ and NO in Fuel Gas on Microalgae Productivity," *J.Chem. Eng. Japan*, **30**, 620-624(1997)
- Materassi R., M.Tredici and W.Balloni; "*Spirulina* culture in sea-water," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **19**, 384-386(1984)
- Miller R.L., A.G.Fredrickson, A.H.Brown and H.M.Tsuchiya; "Hydromechanical Method to Increase Efficiency of Algal Photosynthesis," *IEC Process Design Dev.*, **3**, 134-143(1964)
- Mori K., H.Ohya, K.Matsumoto and H.Furuune; "Sunlight Supply and Gas Exchange Systems in Microalgal Bioreactor," *Adv.Space Res.*, **7**, 47-52(1987)
- Mori K., H.Ohya, K.Matsumoto, H.Furuune, K.Isozaki and P.Siekmeier; "Design for Bioreactor with Sunlight Supply and Operations Systems for Use in the Space Environment," *Adv.Space*

- Res., 9, 161-168 (1989)
- Murakami K., N.Ueki, S.Nomura and H.Ito; "Behavior of Liquid Droplet Exposed to Air Flow on Disk -In Connection with Mist Flow Injected between Parallel Disks-," Proc. of The 72th JSME Spring Annual Meeting, 3, p.179-180, Tokyo, Japan (1995)
- Nakazaki K. and T.Akiyama; Kurorawomotiita tansangasukoteino kanouseihyouka, Kagaku Kogaku shinpojiumu sirizu, SCEJ, p.45-47 (1993)
- Nippon Kagakukai; Kagaku Binran 2nd, 2, 624-626, Maruzen, Tokyo, Japan (1975)
- Nippon Kagakukai; Kagaku Binran 4th, 2, 73-85, Maruzen, Tokyo, Japan (1993)
- 日本機械学会; 気液二相流技術ハンドブック, p.206-210, コロナ社 (1989)
- Nitta K. and M.Yamashita; "Concept Study on the Technology of CELSS," *Earth-Orient.appl. Space Technol.*, 5, 253-263 (1985)
- 新田慶治; "宇宙活動と閉鎖系の生命維持システム," 化学と生物, 24, 13-19 (1986)
- Ogawa T. and G.Terui; "Growth Kinetics of *Spirulina platensis* in Autotrophic and Mixotrophic Culture," *Ferment. Technol. Today*, 543-549 (1972)
- Ogawa T. and S.Aiba; "Carbon Dioxide Assimilation and Growth of a Blue-Green Alga, *Spirulina platensis*, in Continuous Culture," *J.Appl.Chem.Biotechnol.*, 28, 515-521 (1978)
- 小口美津夫, 大坪孔治, 新田慶治, 畑山茂樹; "スピルリナを用いたガス交換及び食糧供給実験," 第29回宇宙科学技術連合講演会, 172-173 (1985)
- Oguchi M., K.Otsubo, K.Nitta and S.Hatayama; "Food Production and Gas Exchange System using Blue-green Alga (*Spirulina*) for CELSS," *Adv.Space Res.*, 4, 7-10 (1987)
- Oguchi M., K.Otsubo, K.Nitta, A.Shimada, S.Fujii, T.Koyano and K.Miki; "Closed and Continuous Algae Cultivation System for Food Production and Gas Exchange in CELSS," *Adv.Space Res.*, 9, 169-177 (1989)
- 尾岸恵三子, 正木治恵; 看護栄養学, p.8-103, 医歯薬出版株式会社, Tokyo, Japan (1996)
- 大平勇一, 干場正昭, 小幡英二, 安藤公二; スピルリナ培地中の直線状藻の除去, 化学工学論文集, 21, 227-230 (1995)
- 大平勇一, 小幡英二, 空閑良壽, 安藤公二; スピルリナの呼吸速度に及ぼす照度の影響, 化学工学論文集, 24, 562-567 (1998)
- Ohira Y., Y.Kuga, K.Ando, K.Idogawa, Y.Nishikawa, T.Fukuda; Formation of Gas-Liquid Hollow Flow under Microgravity, Proceedings of the 6th Asian Conference on Fluidized-Bed and Three-Phase Reactors, p.371-376, Cheju, Korea (1998)
- 大平勇一, 井戸川清, 西川泰則, 福田隆至, 空閑良壽, 安藤公二; 微小重力下におけるスピルリナ育成環境の形成-回転容器内の水-空気系気液界面の形状-, 化学工学論文集, 25, 443-451 (1999a)
- Ohira Y., Y.Kuga, K.Idogawa, K.Ando; "Bubble Controlling in a Bioreactor for *Spirulina platensis* under Microgravity, Proceedings of the Young Asian Biochemical Engineers' Community 1999, p.97-100, Pusan, Korea (1999b)
- Ohira Y., Y.Kuga, K.Idogawa, T.Fukuda, K.Ando; "Bubble Break under Microgravity to Design a Bioreactor in a Space Station, Proceedings of the 5th Asia-Pacific Biochemical Engineering Conference 1999, P-BP20, Phuket, Thailand (1999c)
- Ohira Y., Y.Kuga, K.Idogawa, T.Fukuda, and K.Ando; "Formation Map of Air-Liquid Hollow Profile under Microgravity, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 33, 336-341 (2000a)
- 大平勇一, 阿部丈晴, 空閑良壽, 安藤公二; "スピルリナの酸素発生に及ぼす周期光の影響, 化学工学論文集, 26, 342-346 (2000b)
- 大平勇一, 山田論, 空閑良壽, 小幡英二, 安藤公二; "スピルリナの増殖に及ぼす亜硝酸イオン初濃度の影響, 化学工学論文集, 26, 印刷中 (2000c)
- Ohira Y., Y.Kuga, Y.Miura, K.Idogawa, and K.Ando; "Effect of Centrifugal Force on Bubble Break Time under Microgravity," Proceedings of the 1st Joint China/Japan Chemical Engineering Symposium, in press, Beijing, China (2000d)
- Ohira Y., Y.Kuga, Y.Miura, K.Idogawa, and K.Ando; "Effect of Centrifugal Force on Bubble Break under Microgravity," Proceedings of the Young Asian Biochemical Engineers' Community 2000, in press, Fukuoka, Japan (2000e)

- Ohira Y., Y.Kuga, K.Idogawa, T.Fukuda, and K.Ando: "Effect of Size and Aspect Ratio of a Vessel on Formation of Air-Water Hollow Profile under Microgravity," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, (投稿中)
- Okuno K., K.Tuchiya, T.Ano and M.Shoda: "Effect of Super High Magnetic Field on the Growth of *Escherichia coli* under Various Medium Compositions and Temperature," *J. Ferment. Bioeng.*, **75**, 103-106(1993)
- Okuno K., K.Tsuchiya, T.Ano, M.Shoda and M.Okuda: "A New Cultivation System under a Super High Magnetic Field," *J. Ferment. Bioeng.*, **77**, 453-456(1994)
- 奥沢務, 坪内邦良, 小島吉夫, 神部誠一郎, 浜野亘夫: "微小重力環境下の電磁力場を流れる弱導電性液中の気泡の挙動," 日本機械学会論文集(B編), **61**, 35-364(1995)
- 岡崎健: "石炭の燃焼機構解明における無重力燃焼研究の意義," 日本エネルギー学会誌, **73**, 1039-1045(1994)
- Peerapornpisal Y., S.Chansiriphotha and S.Preongkran: "Nutritional Value of Kleow Thong Alga (*Spirulina platensis*) Cultivated in Sugar Cane Molasses Distillery Slops," Proceedings of the 5th Asia-Pacific Biochemical Engineering Conference 1999, P-IB57, Phuket, Thailand(1999)
- Prasad N., D.A. Wright, J.J.Ford and J.I.Thornby: "Safety of 4-T MR Imaging: Study of Effects on Developing Frog Embryos," *Radiology*, **174**, 251-253(1990)
- Qiao Y.M. and S.Chandra: "Experiments on Adding a Surfactant to Water Drops Boiling on a Hot Surface," *Proc.R.Soc.Lond.A*, **453**, p.673-689, London, UK(1997)
- Richter L.: "Wetting Behavior of Liquids towards Teflon," *Tenside Surf.Det.*, **31**, 189-191(1994)
- Samson R. and A.LeDuy: "Multistage Continuous Cultivation of Blue-Green Alga *Spirulina maxima* in the Flat Tank Photobioreactors with Recycle," *Can.J.Chem.Eng.*, **63**, 105-112(1985)
- Shelef G., W.J.Oswald and P.H.McGauchy: "Algar Reactor for Life Support System," *J.Scan.Eng. Div. Am.Soc.Civ.Eng.*, **96**, 91-110(1970)
- 白石文秀, 富金原悟, 矢野広幸: "めだかとクロレラからなる CELSS のシステム解析" 化学工学会第 27 回秋季大会研究発表講演要旨集, p.359(1994)
- 白石文秀, 矢野広幸, 富金原悟, 河添淳美, 松尾直哉: "めだかーミジンコクロレラからなる閉鎖生態系における酸素循環の速度論的検討" 化学工学会第 28 回秋季大会研究発表講演要旨集, p.188(1995)
- 宇宙開発事業団: 宇宙開発データブック, (財)日本宇宙フォーラム(1997)
- Shyam R and P.V.Sane: "Photoinhibition of Photosynthesis and Its Recovery in Low and High Light Acclimatized Blue-green Algae (Cyanobacteria) *Spirulina platensis*," *Biochem. Physiol. Pflanzen*, **185**, 211-219(1989)
- 須永清, 落合敏: 現代看護学基礎講座 11 栄養学, p.13-52, 真興交易医書出版部(1991)
- Takahashi F. and T.Kamezaki: "Effect of Magnetism on Growth of *Chlorella*," *Hakkokogaku*, **63**, 71-74(1985)
- 高野泰吉: "宇宙基地における生物環境調節," 空気調和・衛生工学, **64**, 141-147(1990)
- 滝口洋・間瀬泰男: "*Spirulina platensis* の Mixotrophic Culture におけるアミノ酸の影響" 発酵工学, **31**, 335-342(1973)
- Tarasevich Y.I.: "Heats of Wetting of Teflon by Water from Adsorption and Contact Wetting Data," *Kolloidn. Zh.*, **53**, 1111-1113(1991)
- Torzillo G., L.Giovannetti, F.Bocci and R.Materassi: "Effect of Oxygen Concentration on the Protein Content of *Spirulina* Biomass," *Biotech.Bioeng.*, **26**, 1134-1135(1984)
- Torzillo G., A.Sacchi and R.Materassi: "Temperature as an Important Factor Affecting Productivity and Night Biomass Loss in *Spirulina platensis* Grown Outdoors in Tublar Photobioreactors," *Bioresource Technology*, **95**, 95-100(1995)
- Tretinnikov O., Y.Uyama and Y.Ikada: "Dynamic Wetting Contact Angle of Polymer Surfaces," *Polymer Preprints Japan*, **42**, 1678(1993)
- Trusch R.B.: "Zero Gravity and Life Support Systems - Friends or Foes?," *SAE Tec.Paper Series*, **1-9**(1982)
- 柘植秀樹, 寺坂宏一: "微小重力下での気泡生成に関する一考察," 化学工学会第 26 回秋季大会研究発表講演要旨集, p.268(1993)

- 柘植秀樹,越田渉,寺坂宏一;"微小重力下での気泡生成,"化学工学会第 27 回秋季大会研究発表講演要旨集,p.360(1994)
- 土師生也,棚澤一郎;"微小重力下における液体中の気泡の挙動に関する研究,"第 8 回宇宙利用シンポジウム,300-305(1991)
- Vonshak A.,S.Boussiba, A.Abeliovich and A.Richmond; "Production of *Spirulina* Biomass: Maintenance of Monoalgal Culture Outdoors," *Biotech.Bioeng.*,**25**,341-349 (1983)
- Vonshak A.,R.Guy, R.Poplawsky and I.Ohad; "Photoinhibition and Its Recovery in Two Strains of the Cyanobacterium *Spirulina platensis*," *Plant Cell Physiol.*,**29**,721-726(1988)
- Wada K.,T.Tamura, H.Matsubara and K.Kodo; "*Spirulina* Ferredoxin-NADP⁺ Reductase Further Characterization with an Improved Preparation," *J.Biochem.*,**94**,387-393(1983)
- Wu J.F. and W.G.Pond; "Amino Acid Composition and Microbial Contamination of *Spirulina maxima*, a Blue-Green Alga, Growth on the Effluent of Different Fermented Animal Wastes," *Bull Environ.Contam.Toxicol.*,**27**,151-159(1981)
- 山本幸弘,佐藤正秀,塚田隆夫,宝沢光紀;"微小重力環境下での気泡の運動に及ぼす不平等電場の影響,"化学工学会第 60 年会研究発表講演要旨集,p.84(1995)
- Yanagimoto M. and H.Saitoh; "Blue Green Algae Coexistent in Stock Culture of *Spirulina*," *Rept. Natl.Food Res.Inst.*, **38**, 96-101(1981)
- Yanagimoto M. and H.Saitoh; "Evaluation Tests of a Large Spiral Blue Green Alga, *Oscillatoria* sp., for biomass production," *J.Ferment.Technol.*,**60**,305-310(1982)
- Yasuda T.,T.Okuno and H.Yasuda; "Contact Angle of Water on Polymer Surfaces," *Langmuir*, **10**, 2435-2439(1994)
- Yokota T., M.Hizume, T.Ohtake and K.Takahashi; "A New Growth Kinetic Model for Photo-Autotrophic Microalgae Culture," *J.Chem.Eng.Japan*, **27**, 399-403(1994)
- Zevenboom W. and L.R.Mur;" Growth and photosynthetic response of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* in relation to photoperiodicity and irradiance," *Arch. Microbiol.*, **139**, 232-239(1984)

謝辞

本研究の遂行並びに本論文をまとめるにあたり終始ご指導・ご鞭撻を賜りました室蘭工業大学工学部 安藤公二教授に深く感謝いたし、心から御礼申し上げます。また、数々のご指導をいただきました竹内隆男教授、花岡裕教授、小幡英二教授、空閑良壽助教授、ならびに有益なご助言をいただきました高橋洋志教授、吉田豊教授、安居光圀講師に厚く御礼申し上げます。

本論文作成にあたり貴重なご指摘、ご教示をいただくとともに北海道工業技術研究所における微小重力実験機会を手配していただきました苫小牧市テクノセンター 福田隆至館長、北海道工業技術研究所 井戸川清室長、武内洋研究企画官、三浦正勝主任研究官に心から感謝いたします。

実験装置の作製にあたりご協力くださいました室蘭工業大学 湯口実技官、北海道工業技術研究所 西川泰則技官に感謝申し上げます。

本研究の遂行にあたり、(財)宇宙環境利用推進センター、(財)北海道地域技術振興センター、(財)日本宇宙フォーラム、地下無重力実験センター利用研究開発委員会から(株)地下無重力実験センターにおける微小重力実験の機会をいただきました。ここに付記し感謝の意を表します。



